

# Energieforschungsprogramm

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

### Endbericht

erstellt am

28/03/2017

# lightSIMheat – Gekoppelte Gebäude- und Lichtsimulation für komplexe Fassadensysteme

Projektnummer: 838718

Ausschreibung	1. Ausschreibung e!Mission.at
Projektstart	01/05/2013
Projektende	31/12/2016
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	44 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, AB Energieeffizientes Bauen
AnsprechpartnerIn	Univ.-Prof. DI Dr. tech. Wolfgang Streicher
Postadresse	Technikerstrasse 13
Telefon	+43 512 507 - 63650
Fax	+43 512 507 - 63699
E-mail	wolfgang.streicher@uibk.ac.at
Website	<a href="http://www.uibk.ac.at/bauphysik/">http://www.uibk.ac.at/bauphysik/</a>

# lightSIMheat

Gekoppelte Gebäude- und Lichtsimulation für komplexe Fassadensysteme

**AutorInnen:**

Martin Hauer, Universität Innsbruck, AB Energieeffizientes Bauen  
Matthias Werner, Universität Innsbruck, AB Energieeffizientes Bauen  
Wolfgang Streicher, Universität Innsbruck, AB Energieeffizientes Bauen

Wilfried Pohl, Bartenbach GmbH  
David Geisler-Moroder, Bartenbach GmbH  
Andreas Ampenberger, Bartenbach GmbH  
Benjamin Steinrücken, Bartenbach GmbH

Michael Grobbauer, SFL technologies GmbH

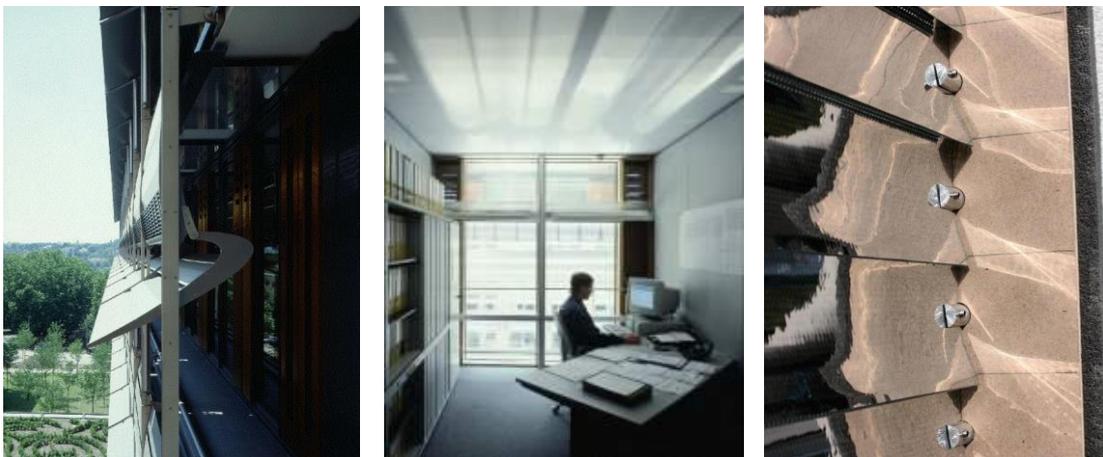
## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Schwerpunkte des Projektes	7
1.2	Einordnung in das Programm	9
1.3	Aufbau der Arbeit	10
2	Inhaltliche Darstellung	13
2.1	Charakterisierung komplexer Verglasungssysteme	13
2.1.1	Definition von Systemkennzahlen zur Charakterisierung der Fassade	14
2.1.2	Entwicklung eines simulationsgestützten Messverfahrens	19
2.1.3	Entwicklung eines in-situ-g-Wert Messgerätes	27
2.2	Lichttechnische Modellierung	32
2.3	Thermische Modellierung	35
2.3.1	Vereinfachte Modellansätze	36
2.3.2	Detaillierte physikalische Modellierung von CFS nach ISO15099 und BSDFs	37
2.3.3	Definition des langwelligen Strahlungsaustausches von CFS Layer	39
2.3.4	Definition des konvektiven Verhaltens von CFS Layer	40
2.4	ARTLIGHT - Kopplung von lichttechnischer und thermischer Simulation	43
2.4.1	Simulationsroutinen ARTLIGHT 1.0 und ARTLIGHT 2.0	43
2.4.2	Neues Simulationsdatenmanagement in ARTLIGHT 2.0	48
2.4.3	Validierung und Laufzeitvergleich:	50
2.4.4	Kopplungsmodelle unterschiedlichen Detaillierungsgrades	52
2.4.5	Verallgemeinerung des Kopplungsansatzes und Multizonen – Anwendung	55
2.5	Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsalgorithmus	56
2.5.1	Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen	56
2.5.2	Ableitung eines vereinfachten Berechnungsalgorithmus	57
3	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	60
3.1	Ergebnisse des simulationsgestützten Messverfahrens	60
3.1.1	Aufbau eines Validierungsmodells zur theoretischen Prüfung des Messverfahrens	60
3.1.2	Statische Validierungsmessung im g-Wert Prüfstand	60
3.1.3	Ergebnisse mit Modellvergleich	64
3.2	Ergebnisse zur lichttechnischen Modelloptimierung	66
3.3	Ergebnisse zur thermischen Modellvalidierung durch Simulation	68
3.3.1	Referenzraumdefinition	68
3.3.2	Validierung der vereinfachten Modellansätze gegen das BSDF/ISO-Modells	69
3.3.3	Resümee	74
3.3.4	Validierung mit dynamischen Messdaten aus einem Langzeitmonitoring	75
3.4	Simulationsstudie zur Anwendung der entwickelten Methoden und Modelle	80
3.4.1	Varianten der Simulationsstudie	80
3.4.2	Modellaufbau	83
3.4.3	Ergebnisauswertung	85

4	Ausblick und Empfehlungen.....	90
5	Literaturverzeichnis.....	92
6	Kontaktdaten.....	93

## 1 Einleitung

Die Fassade als Schnittstelle zwischen Raum- und Außenklima stellt in der Gebäudetechnik einen entscheidenden Faktor dar. Hatten konventionelle Verschattungssysteme (Raffstore, Jalousien, Rollläden...) in der Vergangenheit ihre Aufgabe primär in der Abschattung und des Blendschutzes, so drängen innovativere Systemen heutzutage verstärkt auf den Markt. Durch spezielle Oberflächenbeschaffenheit der Lamellen (hochverspiegelt, etc.) oder durch intelligente Formen (komplexe Lamellengeometrien, Prismenformen, etc.) wird neben den bisherigen Funktionen auch eine aktive Tageslichtnutzung forciert. Zudem werden transparente und dynamische Fassadensysteme heutzutage von der Architektur stark gefordert, in Entwürfen berücksichtigt und auch umgesetzt.



**Abbildung 1: Beispiel innovative Fassade: links / Mitte: ZVK Wiesbaden (Arch. Herzog & Partner),  
rechts: lichtlenkendes Tageslichtsystem**

Dieser Trend bringt zugleich neue Herausforderungen für den Einsatz von Simulations- und Planungswerkzeugen mit sich. Durch die wechselwirkenden Einflüsse transparenter Fassaden bei thermischen und tageslichttechnischen Eigenschaften kann eine getrennte Optimierung beider Aspekte nicht zielführend sein. Wenngleich auch eine Vielzahl an Planungstools am Markt verfügbar sind, bietet aber nur eine überschaubare Anzahl an Simulations- und Planungstools die Möglichkeit dieser integralen Planung, wodurch mit diesem Forschungsprojekt entgegengewirkt wurde.

Fassaden mit lichttechnischem Planungshintergrund vereinen Sonnenschutz und Blendschutz mit einer dosierbaren Nutzung von Tageslicht und einem verbesserten Sichtkontakt nach außen. Die Systeme können starr oder beweglich eingebaut sein und werden vorteilhafterweise in den Scheibenzwischenraum integriert, um Verschmutzung der Oberflächen zu vermeiden.

Die gestellten visuellen Anforderungen sind:

- eine ausreichende Tiefenbelichtung des Raumes
- Optimierung der Gleichmäßigkeit der Belichtung im Raum bei ausreichend Belichtung auf der Nutzfläche

- Vermeidung von Blendung zu jeder Tages- und Jahreszeit
- Möglichst guter Sichtkontakt nach außen

Die gestellten thermischen Anforderungen sind:

- Schutz vor sommerlicher Überhitzung
- Gezielte Nutzung der solaren Einträge im Winter
- Gewährleistung der thermischen Behaglichkeit des Nutzers zu jeder Tages- und Jahreszeit

Je nach Tageszeit (wechselnder Sonnenstand und Außentemperatur) und Jahreszeit widersprechen sich die lichttechnischen und thermischen Anforderungen dabei zum Teil. Nur mit einer integralen Bewertung beider Aspekte kann so eine optimale Situation für die aktuelle Fassadenkonfiguration herausgearbeitet werden. Zusätzlich spielt eine intelligente Steuerung des Fassadenelements eine wesentliche Rolle, wodurch der Umsetzung der Steuerstrategie innerhalb der entwickelten Simulationswerkzeuge eine wesentliche Bedeutung zukommt.

In der Antragstellung des abgeschlossenen Projektes „lightSIMheat“ wurde gezielt auf den herrschenden Mangel an verfügbaren Tools und Werkzeugen hingewiesen sowie die neuen Anforderungen an Bewertungstools für solche Programme dargestellt. Mit der klaren Ausrichtung von „lightSIMheat“ als „Simulationsprojekt“ zur gezielten Modell- und Toolentwicklung konnte fokussiert an diesem Thema gearbeitet werden. Durch die Validierung der entwickelten Methoden bis hin zur Integration in etablierte Simulationstools wie TRNSYS, konnte so wertvolle Entwicklungsarbeit für das Arbeitsfeld der dynamischen Gebäudesimulation geleistet werden.

Im Laufe der Projektlaufzeit zeigte sich ebenso eine stark ansteigende Entwicklungsdynamik auf diesem Gebiet, wodurch mittlerweile auf mehrere wissenschaftliche Publikationen und Entwicklungen verwiesen werden kann. Durch den fachlichen Austausch auf Konferenzen und Fachtagungen sowie Teilnahmen auf mehreren Fachworkshops war man als Konsortium bestrebt, inhaltlich davon zu profitieren und durch Zusammenarbeit die eigene Position zu stärken. Neben den entstandenen fachlichen Entwicklungen wurden während des Projektverlauf so entscheidende und wertvolle Kontakte geknüpft, welche ebenso als ein Erfolg des abgeschlossenen Projektes „lightSIMheat“ bewertet werden können

### 1.1 Schwerpunkte des Projektes

Als Schwerpunkt im Projekt lightSIMheat galt es eine *integrale thermische und lichttechnische Bewertung* von Fassadensystemen innerhalb der dynamischen Gebäudesimulation umzusetzen und zu ermöglichen. Als Simulationsumgebungen als Basis wurden hierfür die am Markt etablierten Programme *TRNSYS* (thermisch-dynamische Mehrzonengebäudesimulation) sowie *RADIANCE* (Tageslichtsimulation) herangezogen. Beide Programme zeichnen sich durch eine sehr hohe Flexibilität in der Anwendung sowie

in einem hohen Detaillierungsgrad in der Modellierung aus, wodurch sie in der forschungsnahen Anwendung sehr stark verbreitet sind.

Parallel zum zunehmenden Trend der Entwicklung vereinfachter Tools für Anwender und Planer in der Praxis, galt das vorrangig Ziel in lightSIMheat der (Weiter-)Entwicklung von Modellen und Werkzeugen für den Experten-Anwender. So konnten im Projekt durch die aktive Kooperation mit Transsolar (Entwickler und Vertreiber von TRNSYS) ein neu implementiertes Modell für die detaillierte *thermische Modellierung* komplexer Verglasungssysteme in Type56 (Multizonen-Gebäudemodell) als Beta-Tester weiterentwickelt werden.

Im Bereich der *lichttechnischen Modellierung* konnten durch hervorragende Kontakte innerhalb des Konsortiums mit den Entwicklern von RADIANCE die neuesten Methoden zur effizienten und sehr detaillierten Tageslichtjahressimulation gegeneinander geprüft und validiert werden. So wurde die in RADIANCE 5.0 neu implementierte Methode des Photon Mapping hinsichtlich einer Nutzbarkeit für die Anwendungen in lightSIMheat untersucht. Ebenso wurden im Projekt Methoden zur genaueren Abbildbarkeit speziell von hochreflektierenden Tageslichtlenksystemen untersucht (Tensor-Tree-BSDFs) und durch Vergleiche mit „standardisierten“ Verfahren hinsichtlich deren Eignung für lightSIMheat bewertet. Am Projektende wurde zusätzlich die verwendete 3-Phasen-Methode zur effizienten Jahressimulation komplexer Fassadenelementen in RADIANCE gegen die detailliertere 5-Phasen-Methode verglichen, dessen Ergebnisse Anstoß für fortführende Entwicklungen bietet.

Für die Entwicklung der *gekoppelten Simulationsroutine* bildeten die detaillierten Vorarbeiten in der thermischen und lichttechnischen Modellierung wesentlichen Input. Ausgehend von einem erstmalig umgesetzten Kopplungskonzept zwischen TRNSYS und RADIANCE, welches noch im Vorgängerprojekt „LichtausFassade“ umgesetzt wurde, erfolgte die schrittweise Einarbeitung der neuen Modelle. Als entscheidende Verbesserung konnte mit der überarbeiteten Kopplungsroutine eine deutlich verbesserte Laufzeit für eine Ganzjahressimulation erreicht werden, ohne dass dabei Einbußen im Detailgrad der Modellierung sowie der Ergebnisdarstellung hingenommen werden mussten.

Zusätzlich zu den detaillierten Methoden wurden im Projekt auch vereinfachte Ansätze untersucht und gegen die detaillierten Verfahren verglichen. So beschäftigte sich ein eigenes Arbeitspaket rein mit der *Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsalgorithmus* zur Bewertung des Tageslichteintrages auf Basis von Klimadaten nach Monatsbilanzen. Dies stellt ein neuartiges Verfahren dar und kann als Methodik flexible in vorhandene Planungstools auf monatsbasierter Bewertung implementiert werden. Dem vorangegangen sind umfangreiche Sensitivitätsanalysen, auf Basis dessen der Einfluss einzelner Parameter auf die Genauigkeit der Modellierung des Tageslichtangebots herausgearbeitet wurde.

Ergänzend zur numerischen Modellentwicklung wurde in einem eigenständigen Arbeitspaket der g-Wert – sowohl aus Sicht einer reinen Bewertungsgröße, als auch in Form einer Modellinputgröße – bewertet und analysiert. Mit einem variablen g-Wert als zweidimensional abhängige Größe vom solaren Einstrahlwinkel wurden vereinfachte Modellansätze zur thermischen Abbildung von Lamellensystemen in TRNSYS implementiert. Als Modellinput kann hierzu ein interpoliertes g-Wert Raster in flexibler Diskretisierung verwendet werden, welches auf Messdaten beruht. Ein simulationsgestütztes Messverfahren, welches auf Basis der Vermessung einzelner Messpunkte ein vollständiges g-Wert Raster erzeugt, wurde hierzu geprüft. Ergänzend dazu wurden erste Konzepte für ein verbessertes Interpolationsverfahren auf Basis eines physikalischen Modells überlegt und erarbeitet. Somit können Modellinputgrößen basierend auf Messdaten an einem realen System und unabhängig von detaillierten

Herstellerangaben für eine thermische Bewertung zur Verfügung gestellt werden. Unsicherheiten in den Angaben sowie Abweichungen von idealen Annahmen können somit ausgeschlossen werden.

In diesem Zusammenhang und im Zuge der Fehleranalyse und Verbesserung des stationären g-Wert Prüfstandes ist zudem Idee und Konzept für ein *mobil anwendbares Messgerät zur Bestimmung von in-situ Betriebs-g-Werten* entstanden. Ursprünglich nicht im Projektantrag vorgesehen, konnte durch genehmigte Mittelumschichtung ein Prototyp innerhalb des Projektes entwickelt und getestet werden.

Neben den der Entwicklung der Simulationsmethoden bildete die Fragestellung einer *umfassenderen Bewertbarkeit insbesondere von Tageslichtlenksystemen* einen weiteren Schwerpunkt im Projekt. Ausgehend von der etablierten Bewertungsgröße des Energiedurchlassgrades transparenter Fassadeflächen (g-Wert) wurde versucht, eine aussagekräftigere Jahresbewertung durch getrennte Betrachtung von Sommer- und Winterfall zu erreichen. Die Entwicklung des in-situ Messgerätes trägt dabei zusätzlich durch eine mögliche Bewertung bereits verbauter Verglasungen bei.

In Form von *Fallstudien* erfolgte schließlich eine Validierung und Prüfung der zum entwickelten Methoden und Modelle. Ident zur getrennten Modellentwicklung (lichttechnisch, thermisch) erfolgte ebenso die Validierung in getrennter Form. Die Funktionsweise und Plausibilität der gekoppelten Routine wurde schließlich in Form einer umfassenden Simulationsstudie bewertet. Auf Basis eines Standard-Referenzraumes wurden unterschiedliche Systeme zur Tageslichtnutzung gegenüber herkömmlichen Verschattungssystemen verglichen. Die Ergebnisse daraus sind ebenso als Erkenntnis aus dem Projekt zu bewerten und zeigen die Leistungsfähigkeit von Tageslichtlenksystemen unter unterschiedlichen Situationen auf.

## 1.2 Einordnung in das Programm

Der Einfluss des Bedarfes an künstlicher Belichtung sowie der Nutzung von Tageslicht auf den Primärenergiebedarf von Gebäuden ist unbestritten. Insbesondere durch den immer besser gedämmten Gebäudebestand kommt diesem Anteil am Gesamtenergieverbrauch mehr Relevanz zu. Der anhaltende architektonische Trend hin zu verglasten Fassaden begegnet diesem Umstand zwar, jedoch wird dadurch die Situation für Heizen/Kühlen im Winter/Sommerfall zunehmend kritischer. Eine integrale Planung der intelligenten Fassade ist daher unerlässlich.

Als übergeordnetes Ziel im Projekt lightSIMheat galt es daher die Innovation tageslichtlenkender Fassadensysteme zu forcieren und durch die Bereitstellung adäquater Planungstool und Simulationswerkzeuge zu unterstützen. Eine gezielte Tageslichtnutzung soll es ermöglichen, den Gesamtenergiebedarf zu senken sowie Heiz- und Kühllasten zu reduzieren – letzte sogar zu eliminieren. Das Forschungsprojekt behandelte daher den Prorammschwerpunkt *Energieeffizienz und Energieeinsparung*, hier im Besonderen den Subschwerpunkt *Energieeffiziente und intelligente Gebäude*. Als besonderes Merkmal konnte in diesem Forschungsprojekt dem Ausschreibungsziel der *Entwicklung von gekoppelten Simulationstools* Rechnung getragen werden. Nur durch diese gekoppelte Betrachtung kann ein lichtlenkendes Fassadensystem als ganzheitliches Konzept bewertet, optimiert und erst dadurch in deren Interaktion mit dem Gesamtgebäude realistische bewertet werden.

Des Weiteren konnte zum Subschwerpunkt *Energieeffiziente Produkte und Systemlösungen* beigetragen werden. Die im Projekt erarbeiteten Kenntnisse und Simulationswerkzeuge unterstützen dabei die verbesserte Entwicklung effizienter Tageslicht- und Kunstlichtsysteme. Die Analyse unterschiedlicher Steuerungs- und Regelstrategien zeigt dabei das Potential an innovativen Fassadensystemen auf und bietet somit positive Argumente hinsichtlich deren Umsetzung in realen Projekten. Durch die Involvierung eines namhaften Fassadenbauers im Konsortium als fach einschlägigen und industrienahen Partner war gewährleistet, trotz komplexer Problemstellungen in der Theorie und Simulation an realisierbaren Lösungen zu arbeiten. Nicht zuletzt konnte durch neue Ideen während des Projektverlaufes eine Erstentwicklung eines Konzeptes zur g-Wert Bestimmung umgesetzt werden, was insbesondere eine verbesserte Systembewertung ermöglicht.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Das Forschungsprojekt lightSIMheat war mit klarem Schwerpunkt auf Simulation und Modellentwicklung ausgerichtet. Auf Basis des Kenntnisstands aus dem Vorprojekt „LichtausFassade“ wurde an den vorhandenen Methoden zur thermischen und lichttechnischen Modellierung von komplexen Verglasungssystemen sowie deren Kopplung weitergearbeitet und die Kenntnisse darin vertieft. In Abb.1 ist dazu der Ablauf im Projektes in Form eines Flussbildes der beinhalteten Arbeitsschwerpunkte dargestellt. Gemäß den verwendeten Methoden (Analyse – Modellierung – Kopplung – Erprobung) wurden die aufeinanderfolgenden Arbeitsschritte definiert.

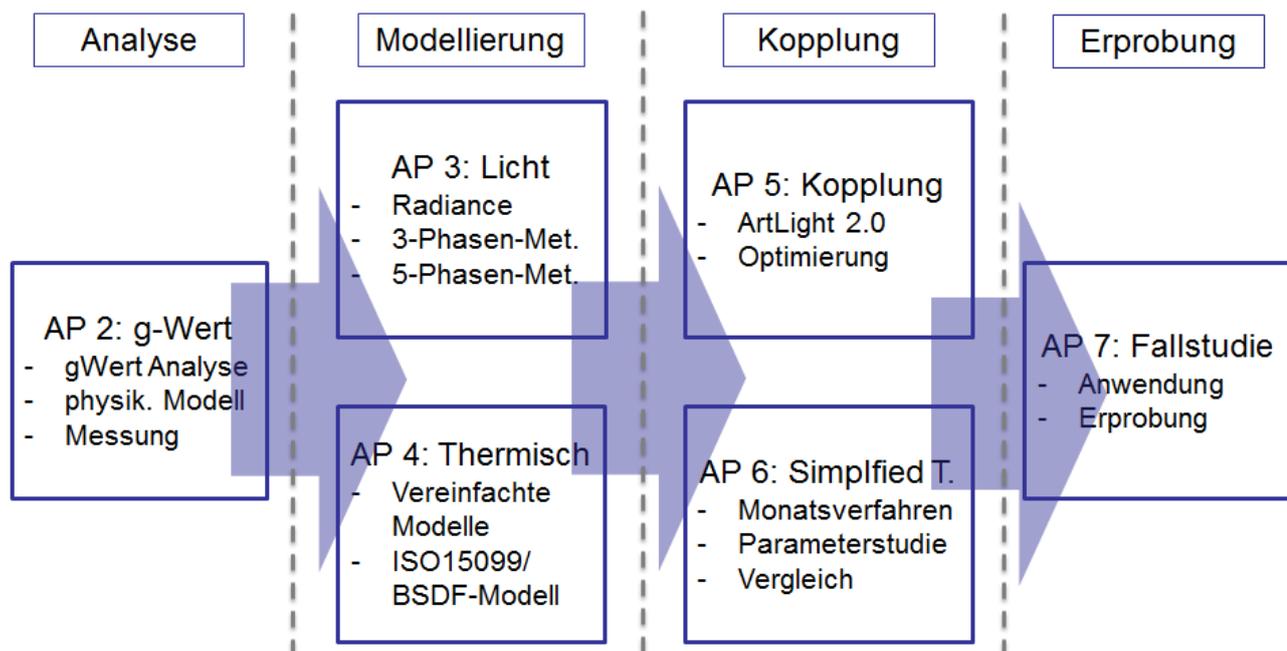


Abbildung 2: Projekt-Workflow anhand der Arbeitspakete

In einer *ersten Analysephase* wurde das Thema *g-Wert und thermische Modellierung* bearbeitet. Ausgehend von einer umfassenden Analyse auf physikalischen Prinzipien (Transmission, sekundäre Wärmeabgabe, Einflussparameter auf den g-Werte) wurde der g-Wert im Projekt sowohl in seiner ursprünglichen Funktion als Bewertungsgröße des gesamtenergetischen Eintrages und im weiteren Verlauf als Inputparameter für die thermische Simulation verwendet. Dazu wurde die Definition des stationären g-Wertes erweitert und als variable, zweidimensional vom solaren Einstrahlwinkel abhängige Größe verwendet.

Nachdem der stationäre g-Wert in seiner ursprünglichen Form nicht als Eingangswert in die Simulation vorgesehen ist, war es Ziel der physikalischen Analysen, auftretenden Phänomene und Prozesse an thermischen Austauschvorgängen innerhalb eines komplexen Verglasungssystems (langwellige Strahlung, Konvektion, Wärmeleitung) zu analysieren und besser zu verstehen. Diese Erkenntnisse bildeten in weiterer Folge Input für den Arbeitsschwerpunkt Thermische Modellierung, wo diese dann in Form von vereinfachten thermischen Modellen im Gebäudesimulationstool TRNSYS umgesetzt wurden. Detaillierte thermische Simulationen konnten mit Hilfe eines komplexen Simulationsmodells auf Basis der ISO15099 und thermischen BSDF-Daten als Input umgesetzt werden. Dieses wurde dem Projektkonsortium vom Entwickler Transsolar als beta-Version für Test- und Entwicklungszwecke zur Verfügung gestellt. Neben der modellierungstechnischen Verbesserung des komplexen Modells konnten in weiterer Folge damit auch die vereinfachten Modelle im Projekt simulationstechnisch validiert werden.

Um für komplexe Verglasungssysteme eine aussagekräftigere *Kennzahl* zur Verfügung zu haben als den g-Wert als stationären Einzelwert (Vergleich Verglasungen), hat man sich auf eine jahresbasierte Bewertung festgelegt. So soll es das Ziel eines jeden intelligenten Fassadensystems sein, im Winter höhere g-Werte zu erzielen um solare Gewinne nutzbar zu machen sowie niedrige g-Werte im Sommer gewährleisten um Überhitzung zu vermeiden. Dieses Prinzip ermöglicht eine bessere Beschreibung der energetischen Performance und ist auf alle Systeme anzuwenden, egal ob es sich um eine konventionelle Abschattungslamelle oder komplexe Tageslichtlenklamellen handelt.

Ein weiterer Arbeitsschwerpunkt zum Thema g-Wert beschäftigte sich mit der exakten und verbesserten Vermessung und Bestimmung des g-Wertes von komplexen Verglasungssystemen. Dazu wurden parallel zum Projektverlauf verbessernde Maßnahmen am kalorimetrischen Messprüfstand beim Projektpartner Bartenbach ausgearbeitet und umgesetzt. Neben Verbesserungen an der Prüfstandsmesstechnik und der Ansteuerung im Betrieb wurde eine umfangreiche thermische Analyse durchgeführt. Als Ergebnis konnten Fehlereinflüsse aufgrund thermischer Leckströme etc. genau quantifiziert werden und in Form einer überarbeiteten Fehlerrechnung für zukünftige Messungen berücksichtigt werden.

Basierend auf den auftretenden Fehlereinflüssen, welche zwangsweise bei einer kalorimetrischen Messmethode auftreten, entstand innerhalb des Projektes Idee und Konzept für ein neuartiges Messgerät zu In-situ Vermessung von „Betriebs“- g-Werten an bereits verbauten Verglasungssystemen. Die Idee dazu war zudem getrieben von der ursprünglichen Idee im Projekt der Umsetzung eines simulationsgestützten Messverfahrens zur Ermittlung der zweidimensional abhängiger g-Werte von komplexen Verglasungssystemen. Diese sind zum einen für Systeme mit Lamellensystemen unerlässlich

und können weiterführend auch für die thermische Modellierung verwendet werden. In Zusammenarbeit mit einem namhaften Messgeräteentwickler in Deutschland konnte so ein erster Prototyp innerhalb des Projektes umgesetzt werden.

In einer darauffolgenden Modellierungsphase wurden die beiden Bereiche der lichttechnischen und thermischen Modellierung vorerst getrennt bearbeitet. Während die lichttechnische Modellierung auf der Simulationsumgebung RADIANCE basiert, erfolgt die gesamte thermische Modellierung (Gebäudehülle + Fassade) in TRNSYS. In beiden Fällen wurden bestehende Methoden auf deren Eignung und Genauigkeit geprüft bzw. verbessert. In der lichttechnischen Modellierung wurden insbesondere existierende Himmelsmodelle, unterschiedliche Diskretisierungsformate von Bidirectional Scattering Distribution Functions (BSDFs) sowie etablierte Methoden zur Beschreibung des Tageslichteintrages durch komplexe Verglasungssysteme in der Jahressimulation (3/5-Phasen Methode, Photon Map) auf deren Eignung zur Anwendung im Projekt analysiert. In der thermischen Modellierung wurde versucht anhand vereinfachten Ansätzen eine hinreichend exakte Modellierung von CFS-Systemen zu ermöglichen. Dazu wurden diese mit einem detaillierten numerischen Modell verglichen sowie anhand von Messdaten validiert.

Nach Abschluss der Modellierungsphase wurden beide Teilaspekte für die gekoppelte Betrachtung wieder zusammengeführt. Dabei wurde an zwei unterschiedlichen Zielsetzungen gearbeitet: zum einen an der verbesserten Kopplungsroutine ARTLIGHT als eine effizient lauffähige Routine für die dynamische Gebäudesimulation, als auch an vereinfachten Algorithmen, welche eine hinreichend genaue Bewertung des Tageslichtangebots bei monatsbasierten Berechnungstools erlaubt. Für das Tool ARTLIGHT wurden die Modelle aus den vorherigen Arbeitsschwerpunkten (lichttechnische/ thermische Modellierung) verwendet.

Am Ende des Projektes wurden die umgesetzten Methoden anhand von Fallstudien erprobt. Für die Validierung der thermischen Modelle wurde neben stationären Messdaten eine Langzeitmessung an einer Bürofassade durchgeführt und mit Simulationsergebnissen verglichen. Die Kopplungsroutine ARTLIGHT sowie die vereinfachten Berechnungsverfahren wurden anhand simulationstechnischer Fallstudien sowie in Vergleich mit anderen Simulationsprogrammen auf Plausibilität und Funktionalität geprüft.

Eine detaillierte Darstellung der erarbeiteten Inhalte sowie der Endergebnisse sind in den folgenden Kapiteln angeführt.

## 2 Inhaltliche Darstellung

### 2.1 Charakterisierung komplexer Verglasungssysteme

In einer ersten Analysephase wurde das Thema g-Wert und thermische Modellierung einer komplexen Fassade im Generellen bearbeitet. Dabei wurde die Charakterisierung komplexer Verglasungssysteme sowohl anhand von komplexen Simulationen als auch durch Messungen umgesetzt. Ausgehend von einer umfassenden Analyse auf physikalischen Prinzipien (Transmission, sekundäre Wärmeabgabe, Einflussparameter auf den g-Werte) wurde der g-Wert im Projekt sowohl in seiner ursprünglichen Funktion als Bewertungsgröße des gesamtenergetischen Eintrages und im weiteren Verlauf als Inputparameter für die thermische Simulation verwendet. Dazu wurde die Definition des stationären g-Wertes erweitert und als variable, zweidimensional vom solaren Einstrahlwinkel abhängige Größe verwendet.

In Kapitel 3.1.1. sind dazu erarbeitete Definitionen von Systemkennzahlen zur Charakterisierung komplexer Verglasungssysteme auf Basis des erweiterten g-Wert Ansatzes dargestellt. War es bisher durch g-Werte nur möglich, eine Bewertung der energetischen Performance von reinen Verglasungssystemen zu machen, so erlauben die entwickelten Definitionen eine erweiterte Anwendung auch auf komplexe Verglasungssysteme mit Lamellen. Analog zur lichttechnischen Charakterisierung sind auch thermische Kennzahlen zur Vereinfachung entwickelt worden, welche im folgenden Kapitel erläutert werden.

Um die Überlegungen zur Fassadencharakterisierung auf Basis des zweidimensional-winkelabhängigen g-Wertes noch zu stärken, wurde ein simulationsgestütztes Messverfahren ausgearbeitet, welches in Kapitel 3.1.2. näher ausgeführt ist. Ziel war es, eine Bewertung von Fassadensystemen anhand der definierten Systemkennzahlen basierend auf realen Messungen im g-Wert Prüfstand durchzuführen. Dies bietet den Vorteil, dass man unabhängig von Herstellerangaben qualitative Aussagen zur Performance des komplexen Lamellensystems machen kann. Zudem sind weniger Detailangaben zur Bewertung notwendig, da sich die gesamten Kennzahlen vom gemessenen ‚Summen-‘ g-Wert ableiten lassen. Die Überlegungen zur Fassadencharakterisierung wurden im weiteren Verlauf aber auch in der Modellierung angewandt und in Form von vereinfachten Modellansätzen in die dynamische Gebäudesimulation eingebunden, welche in Kapitel 3.3.1 im Detail ausgeführt sind.

Ein weiteres Ergebnis aus den Forschungsarbeiten zur Fassadencharakterisierung war zudem die Idee, Konzept und Prototyp eines neuartigen Messverfahrens zur In-Situ Bestimmung von „Betriebs“-g-Werten an bereits verbauten Verglasungssystemen. Dieses ist basierend auf den Erfahrungen bzw. den gegebenen Einschränkungen mit dem simulationsgestützten Messverfahren auf Basis stationärer Messungen entstanden. Speziell für die praktische Anwendung in der Qualitätssicherung ist das Thema der in-Situ Messung zur Modellkalibrierung hochspannend. Konzept und ein erster Prototyp sind in Kapitel 3.1.3 dargestellt.

### 2.1.1 Definition von Systemkennzahlen zur Charakterisierung der Fassade

Für eine einfache und anschauliche Charakterisierung eines komplexen Fassadenelementes werden Kennzahlen zur thermischen und lichttechnischen Charakterisierung vorgeschlagen. Die Notwendigkeit der Kennzahlen wird anhand der gerichteten winkelabhängigen Transmission  $\tau(\vec{\omega}_{ein})$  aufgezeigt.

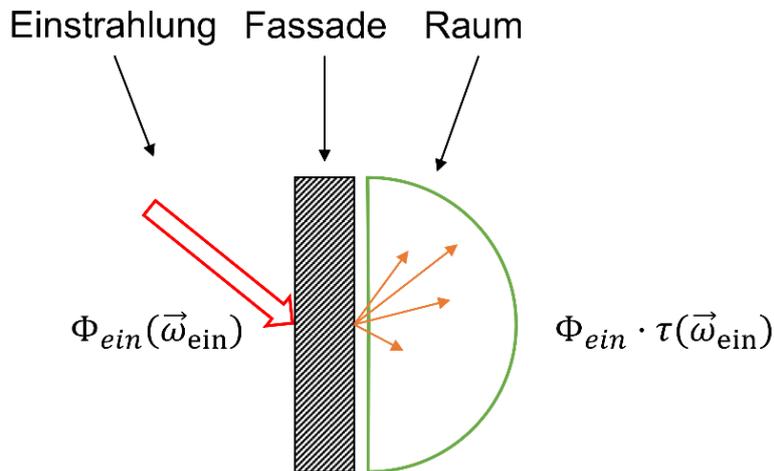


Abbildung 3: Schematische Darstellung der winkelabhängigen Transmission

Aufgrund der in Abbildung 3 dargestellten Winkelabhängigkeit der Transmission muss für jeden Einstrahlwinkel  $\vec{\omega}_{ein}$  das zugehörige  $\tau$  bekannt sein. Folglich ergibt sich eine  $\tau$ -Verteilung für den gesamten Halbraum:

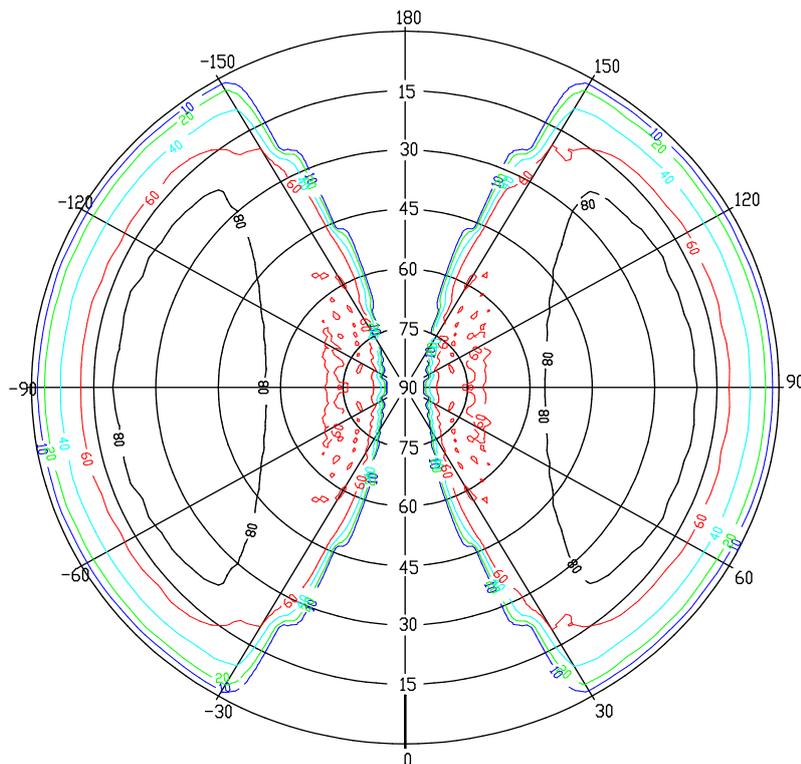
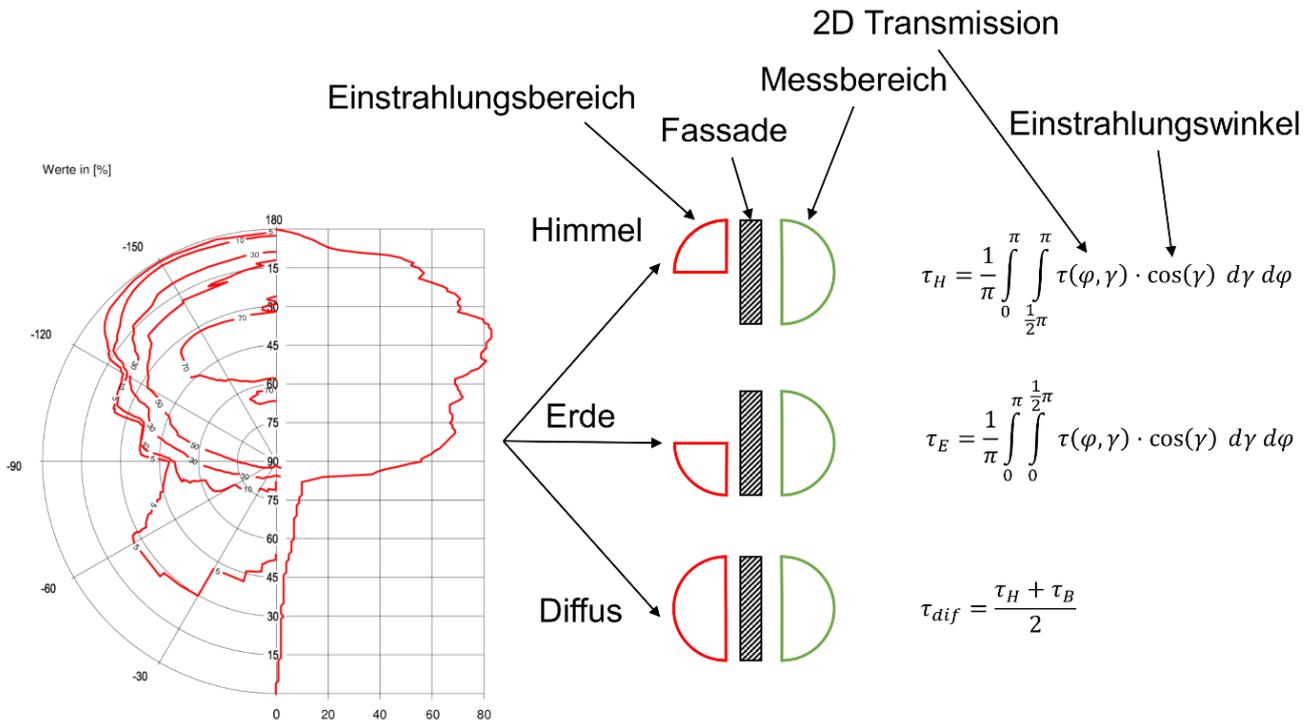


Abbildung 4: Darstellung der gerichteten Transmission mit Isolinien

Um das in Abbildung 4 dargestellte Ergebnis zu vereinfachen wird der Halbraum in einen Viertelraum unterteilt. Durch Integration wird die Transmission von dem Einstrahlungsviertelraum berechnet. In Abbildung 5 sind die Viertelräume schematisch dargestellt und die Berechnungsgleichungen angegeben.



**Abbildung 5: Vereinfachung der Transmission, Aufteilung des Halbraumes in Viertelräume und Unterteilung in die drei relevanten Fälle (Himmel, Erde, Diffus) mit Angabe der Berechnungsgleichungen**

Analog zur Transmission wird auch die ausgestrahlte Leuchtdichteverteilung vereinfacht. Die schematische Vorgehensweise dazu ist in Abbildung 6 dargestellt. Um die Auswirkungen der Verwendung der Vereinfachungen zu überprüfen wird ein Beispiel berechnet. Die ausgestrahlte Leuchtdichteverteilung bei diffuser Einstrahlung ist für ein Fisch-System in Abbildung 7 dargestellt.

Das Fisch-System ist so entwickelt, dass das vom Himmel kommende Licht wieder an die Raumdecke reflektiert wird. Der durch Reflektion von Erd-Richtung kommende Anteil wird ausgeblendet. Dies zeigt sich in hohen Übereinstimmung zwischen Fall 1 und 2. Folglich muss nur der Fall Himmel-Decke beachtet werden, die Kennzahl  $\tau_{HD}$  ist ausreichend um das Verhalten des Systems abzuschätzen.

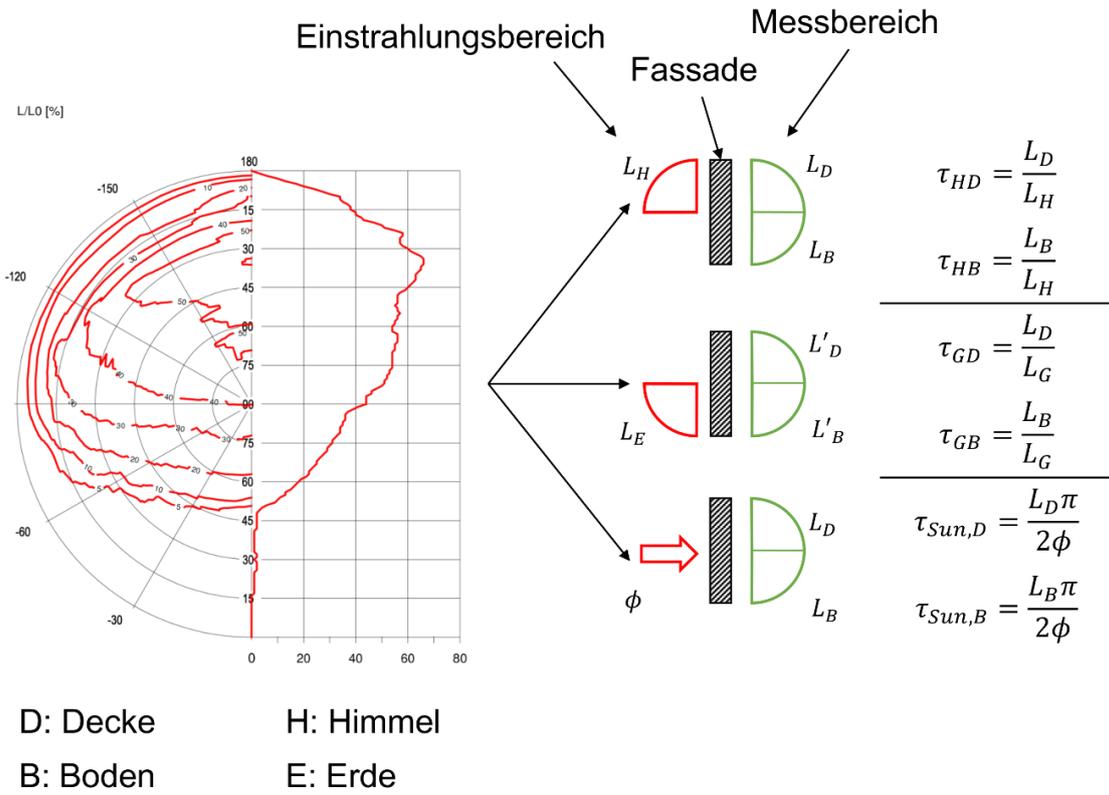


Abbildung 6: Vereinfachung der ausgestrahlten Leuchtdichteverteilung durch Unterteilung des Halbraumes in Viertelräume und Bildung von sechs verschiedenen Kennzahlen

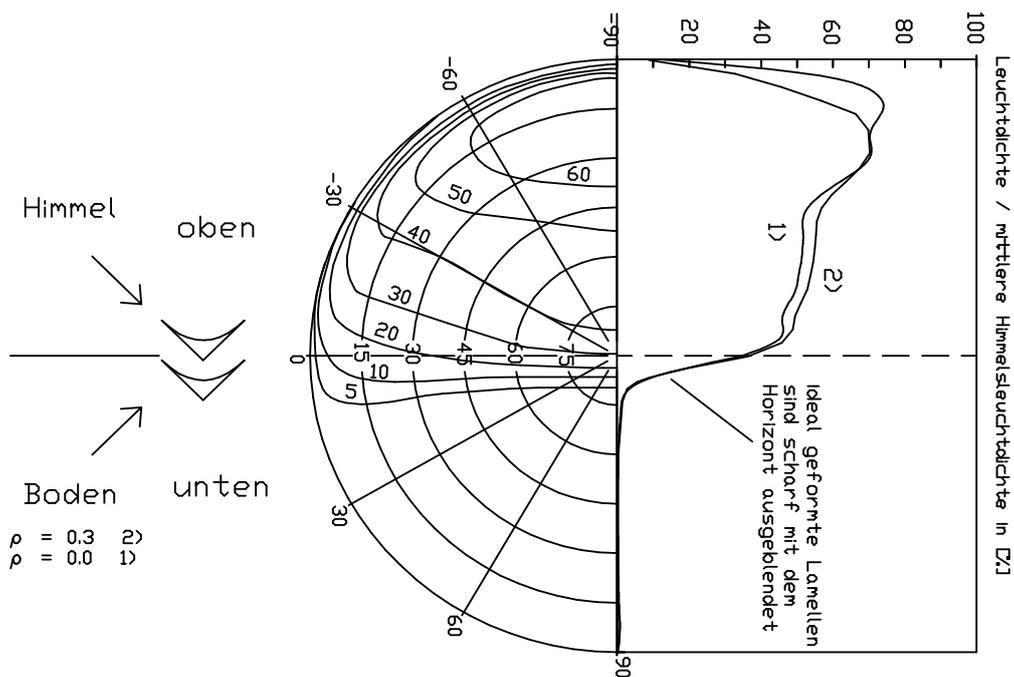


Abbildung 7: Auswirkungen der Vereinfachung auf das Ergebnis, Fall 1 vereinfacht nur mit direktem Anteil und ohne Reflexion auf der Erde, Fall 2 mit diffuser Reflexion auf der Erde

Da die Kennwerte eine Aussage zur Richtungsverteilung erlauben, kann die Leuchtdichte den unterschiedlichen Raumflächen zugeordnet werden. Dies wird exemplarisch am Beispiel eines Standardraumes durchgeführt.

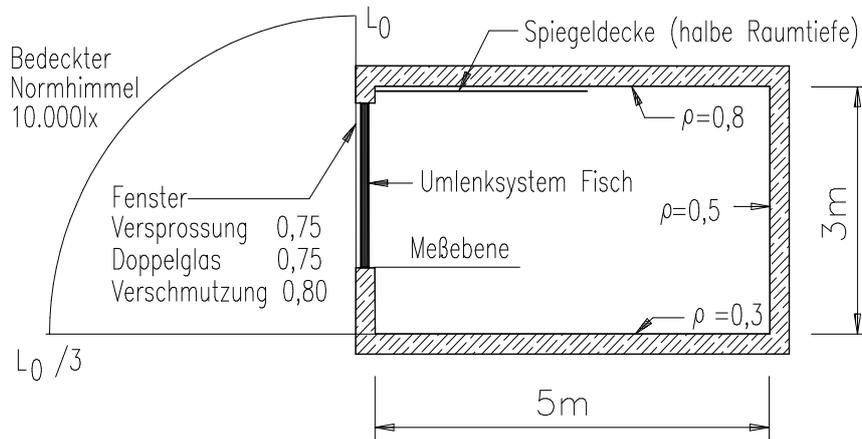


Abbildung 8: Definition des Standardraumes mit Maßen und Minderungsfaktoren des Tageslichtsystems

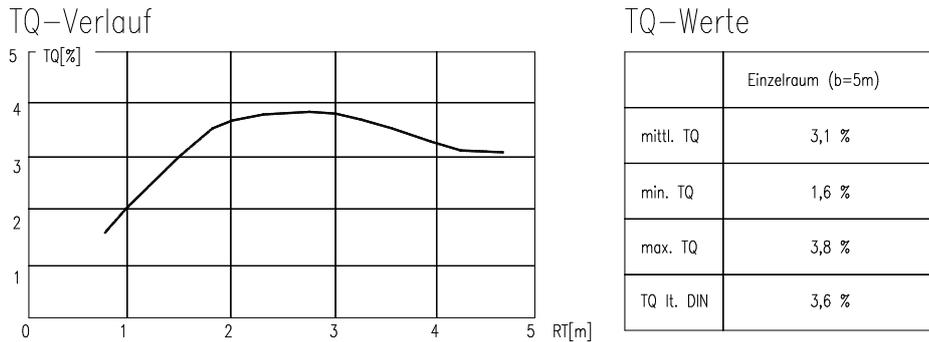


Abbildung 9: Ergebnis der Berechnung mit den Kennzahlen

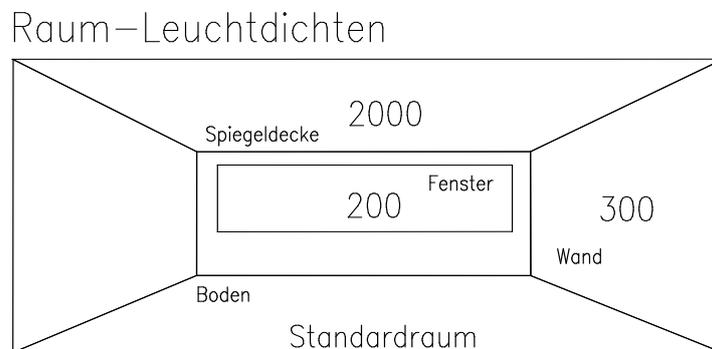


Abbildung 10: Berechnete Leuchtdichten an unterschiedlichen Positionen im Standardraum

Diese Werte für einen Standardraum erlauben eine anschaulichen, schnellen und einfachen Vergleich zwischen verschiedenen Fassadensystemen.

Analog zur lichttechnischen Charakterisierung sind auch thermische Kennzahlen zur Vereinfachung entwickelt worden. Der g-Wert eines Tageslichtsystems ist analog zu den vorherigen Kennzahlen eine Funktion des Einstrahlwinkels. Um ein einfaches und aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten wird der mittlere g-Wert über einen ganzen Tag bestimmt. Am längsten und kürzesten Tag des Jahres (21.06 und 21.12) wird jeweils für eine Süd- und Ost-Fassade der g-Wert ermittelt. Diese vier Kennzahlen geben die Abhängigkeit des g-Wertes eines Tageslichtsystems vom Sonnenstand und der Fassadenausrichtung wieder. In Abbildung 11 sind alle entwickelten Kennzahlen zusammengefasst.

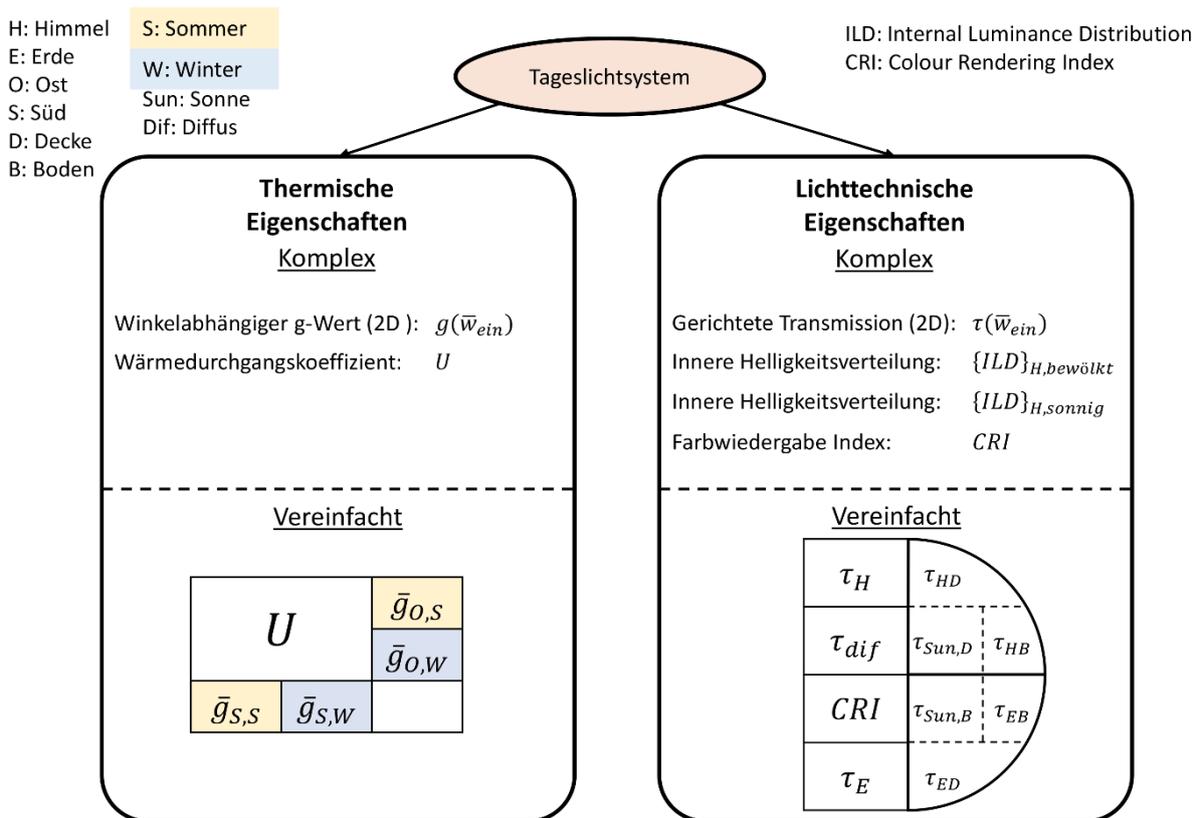


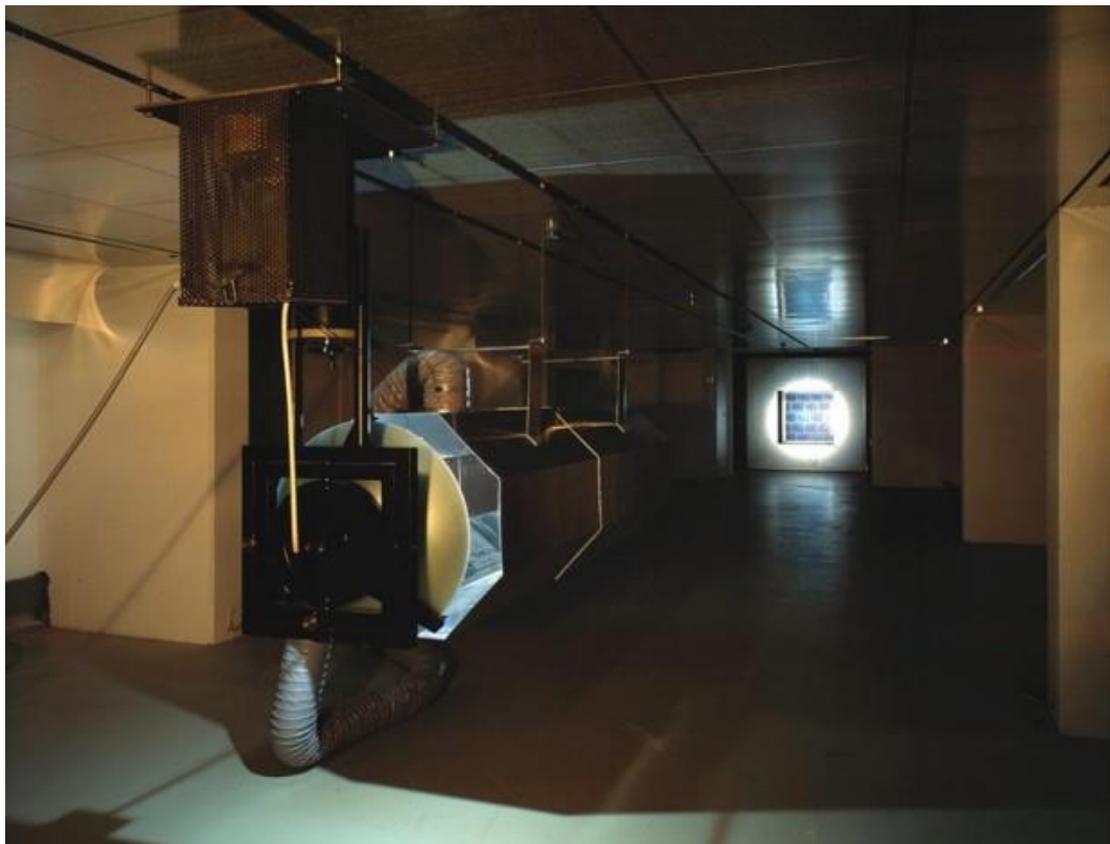
Abbildung 11: Zusammenfassung der entwickelten Kennzahlen

### 2.1.2 Entwicklung eines simulationsgestützten Messverfahrens

1999 wurde bei Bartenbach im Zuge eines EU-Forschungsprojektes („Sun shading devices“) eine g-Wert Messkammer entwickelt und anschließend erstmals winkelabhängige g-Werte im gesamten Hemisphärenbereich gemessen. Die Messungen waren aber sehr aufwendig und kostspielig, und sie erforderten den Einsatz einer sehr erfahrenen Fachkraft (händische thermische Stabilisierung, rechenintensive Auswertung und Darstellung).

Die Messung eines singulären Punktes dauerte ca. einen Tag, so dass nur wenige „Stützstellen“ gemessen werden konnten und zwischenliegende Bereiche interpoliert werden mussten.

Ziel des geplanten neuen simulationsgestützten Messverfahrens war einerseits die Anzahl der Messpunkte durch eine optimierte Anlagenbetriebsführung zu erhöhen und andererseits die immer noch notwendige Interpolation zu verbessern (Nutzung und Integration von neuen Simulationsverfahren). Dazu sollte mithilfe eines sogenannten „opto-thermischen“ Messverfahrens der gemessene g-Wert-Raster interpoliert werden, indem die Werte mit einer schnellen und einfachen lichttechnischen Messung ergänzt werden. Für dieses „opto-thermische“ Messverfahren wird neben dem bauphysikalischen Messmuster (1 x 1 m) auch ein lichttechnisches Messmuster (ca. 0.4 x 0.4 m) benötigt. In Abbildung 12 ist ein Foto der Messanlage im laufendem Betrieb dargestellt.



**Abbildung 12: g-Wert Messanlage bei Bartenbach (Solarsimulator im Vordergrund, hinten die thermische Messkammer)**

Im Vordergrund ist der Solar Simulator zu erkennen. Der durch dieses Bauteil erzeugte Lichtstrahl trifft auf die Probe in der Klimakammer, dargestellt im Hintergrund.

Nach Durchtritt durch die Probe wird die eingestrahlte Energie von der Absorberplatte absorbiert und anschließend in Form von Wärme an das Kühlwasser abgegeben. Bei konstanter Absorbertemperatur kann durch das Bestimmen von Ein- und Austrittstemperatur sowie dem Volumenstrom des Kühlwassers der Betrag des Wärmestromes bestimmt werden. In Abbildung 13 wird der schematische Aufbau der Anlage dargestellt.

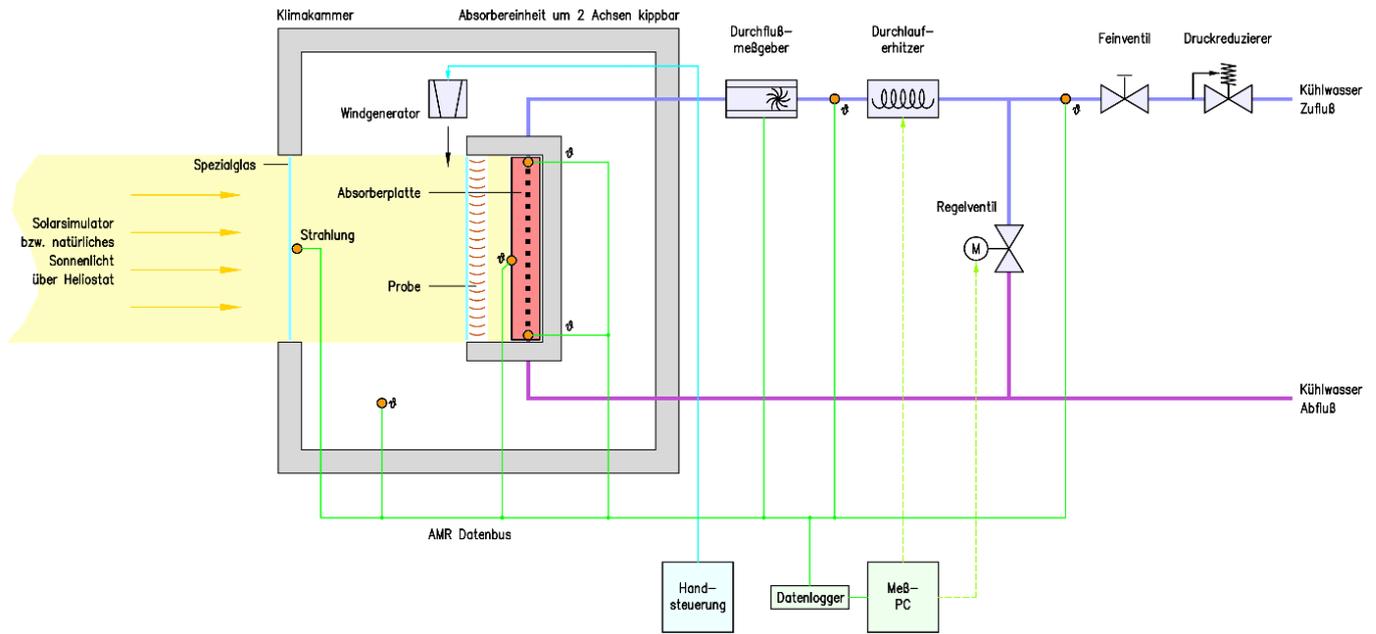


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Messprinzips der g-Wert Messanlage bei Bartenbach

Die Messanlage arbeitet nach einer Referenzmethode. Für jede Messung wird eine Referenzprobe  $R$  mit bekanntem g-Wert  $G_R$  vermessen und der absorbierte Wärmestrom  $\dot{Q}_R$  bestimmt. Anschließend wird die zu untersuchende Probe  $P$  eingebaut. Wieder wird der am Absorber absorbierte Wärmestrom  $\dot{Q}_P$  gemessen. Der g-Wert  $G$  der Probe wird nach (12) bestimmt.

$$G = \frac{\dot{Q}_P}{\dot{Q}_R} \cdot G_R \tag{12}$$

Das Aufnehmen der Messdaten beginnt, sobald das System einen stationären Zustand erreicht hat. Das System gilt als stationär sobald die Temperatur der Absorberplatte über ein gewisses Zeitintervall konstant bleibt. Die Temperatur der Platte und die Temperatur im Innern der Klimakammer werden von dem Anlagenbediener gleich gehalten. Hierdurch wird, in der Theorie, ein ungewollter Wärmestrom von dem Absorber in die Umgebung verhindert. An späterer Stelle wird das Verhalten der Klimakammertemperatur und der Absorberplatte noch genauer untersucht. Das Aufnehmen der Messdaten erfolgt über ein Zeitintervall von mindestens 30 Minuten. Die Messgeräte lesen alle Sensoren im 4 Sekunden Takt aus. Der über das Kühlwasser abgeführte Wärmestrom wird berechnet.

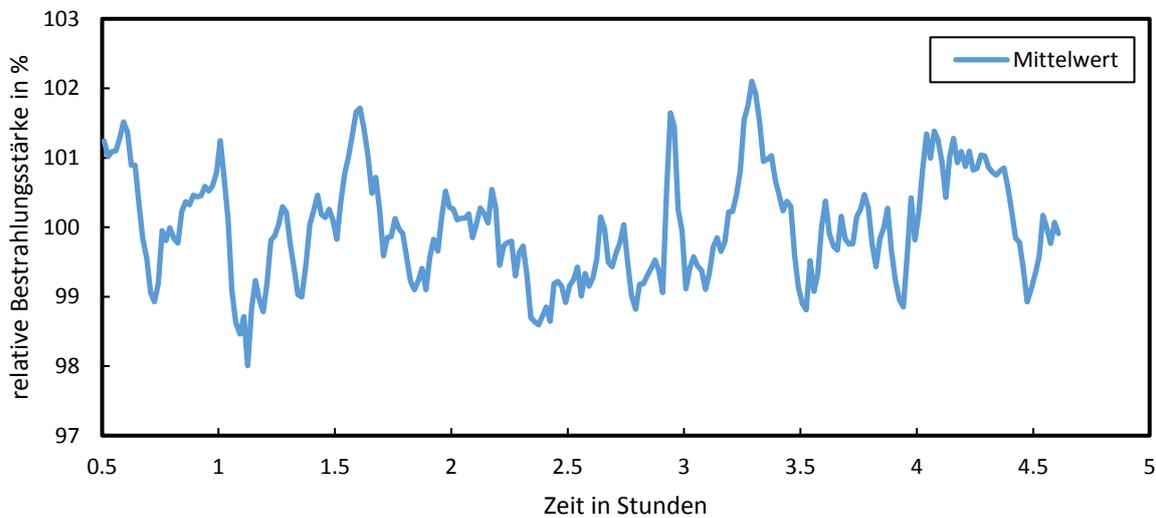
Für das simulationsgestützte Messverfahren ist eine einfache Bedienbarkeit der Anlage notwendig. Das Vermessen von mehreren Stützstellen einer Probe für eine Simulation erfordert eine Anlage die bei geringem manuellen Aufwand schnelle und genaue Messungen ermöglicht. Um dies zu erreichen wurde die Messanlage auf Fehlerquellen untersucht und automatisiert.

### **Untersuchung der Anlage**

Das Bestimmen der Unsicherheiten der Messanlage bildet die Grundlage für eine Verbesserung der Anlage und Verwendung der Messergebnisse zur Validierung von Simulationen. Aus diesem Grund wurden die Messunsicherheiten in Theorie und Versuchen ausführlich untersucht. Grundlage hierfür bildet ein Nicht-Gauß'sches Fehlermodell. Sämtliche Komponenten der Messanlage wurden auf Fehlerquellen statistischer und systematischer Natur untersucht. Diese Fehlerquellen wurden anschließend durch Versuche und Berechnungen mathematisch bewertet und klassifiziert. Die lokalisierten Fehlerquellen wurden ihrer Art entsprechend in ein mathematisches Modell integriert. Zur Auswertung und Validierung des Modelles wurden die selbe Probe sechsmal vermessen und die Unsicherheiten der Ergebnisse bestimmt. Durch Mittelwertbildung wurde aus diesen Unsicherheiten eine Gesamtunsicherheit für die Messanlage bestimmt. Die experimentelle Bestimmung der Wiederholgenauigkeit erlaubt eine Überprüfung des Fehlermodelles. Ausgehend vom Beispiel des Solar Simulators wird die Analyse der Fehlerquelle und anschließende Integration der Ergebnisse in das Modell beschrieben.

Aufgrund der komplexen, im Innern des Leuchtmittels ablaufenden, physikalischen und chemischen Prozesse ist die emittierte Bestrahlungsleistung nicht konstant. In einem Langzeitversuch wurde mit Hilfe eines Pyranometers diese Leistung über einen Zeitraum von 4,5 Stunden untersucht. Um die niederfrequenten Schwankungen der Bestrahlungsstärke von einem hochfrequenten Messrauschen zu trennen wurden aus 30 Messwerten pro Minute jeweils ein Mittelwert gebildet. Überprüft wurde die Trennung von nieder- und hochfrequenter Schwankungen durch eine Wiederholung des Versuchs mit 60 Messwerten pro Minute. Die empirische Standardabweichung der beiden Versuche war bei ähnlicher Versuchsdauer identisch. Folglich wurde nicht das Messrauschen detektiert, sondern die tatsächlichen Schwankungen des Solar Simulators.

### Langzeituntersuchung des Solar Simulators



**Abbildung 14: Bestimmung des Solar Simulators als Fehlerquelle**

In Abbildung 14 ist der Verlauf der Schwankungen des Solar Simulators nach Abschluss eines 30-minütigen Anlaufvorganges dargestellt. Die Amplitude der detektierten Schwankungen liegt innerhalb eines Intervalls von  $\pm 2\%$ , ein periodisches Verhalten zeichnet sich nicht ab. Um die ermittelte Fehlerquelle in das Fehlermodell zu integrieren ist es notwendig zwischen systematischen und statistischen Fehlerquellen zu unterscheiden. Da eine statistische Fehlerquelle nur bei annähernder Gauß-Verteilung vorliegt wurden in Abbildung 15 die Wahrscheinlichkeitsdichte der Messwerte mit Hilfe eines Histogramms bestimmt und mit einer Gauß-Verteilung verglichen.

Die gemessenen Schwankungen sind annähernd normalverteilt, die Bestrahlungsstärke ist eine systematische Fehlerquelle mit einer Standardabweichung von  $\pm 0,84\%$ . Als solche wird sie in das Fehlermodell integriert. Eine Auswertung des Fehlermodelles ist in Abbildung 16 dargestellt. Die mittlere Messunsicherheit von  $10,2\%$  für eine 30-minütige Messung wird zur besseren Veranschaulichung in ihre einzelnen Komponenten aufgespalten.

Auffallend ist der hohe Einfluss des Wärmeverluststromes von  $4,0\%$ . Dieser Wärmeverluststrom vom Messbilanzraum an die Umgebung kann durch eine optimierte Betriebsweise verkleinert werden. Um dies zu erreichen wurde eine neue Regelung der Messanlage entwickelt um die Führungsgrößen besser zu erreichen und den Wärmeverluststrom zu verringern. Eine weitere Verbesserung der Genauigkeit ist durch einen längeren Messzeitraum möglich. Um diese Möglichkeit zu bewerten wurde mit Hilfe des Fehlermodelles verschiedene Messdauern simuliert und in Abbildung 17 dargestellt.

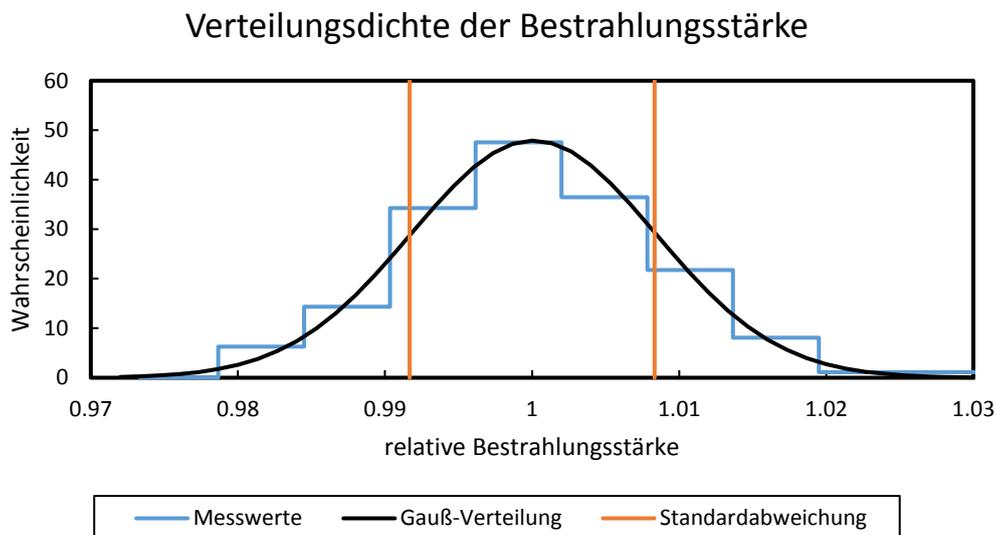


Abbildung 15: Verteilungsdichte der Schwankungen des Solar Simulators

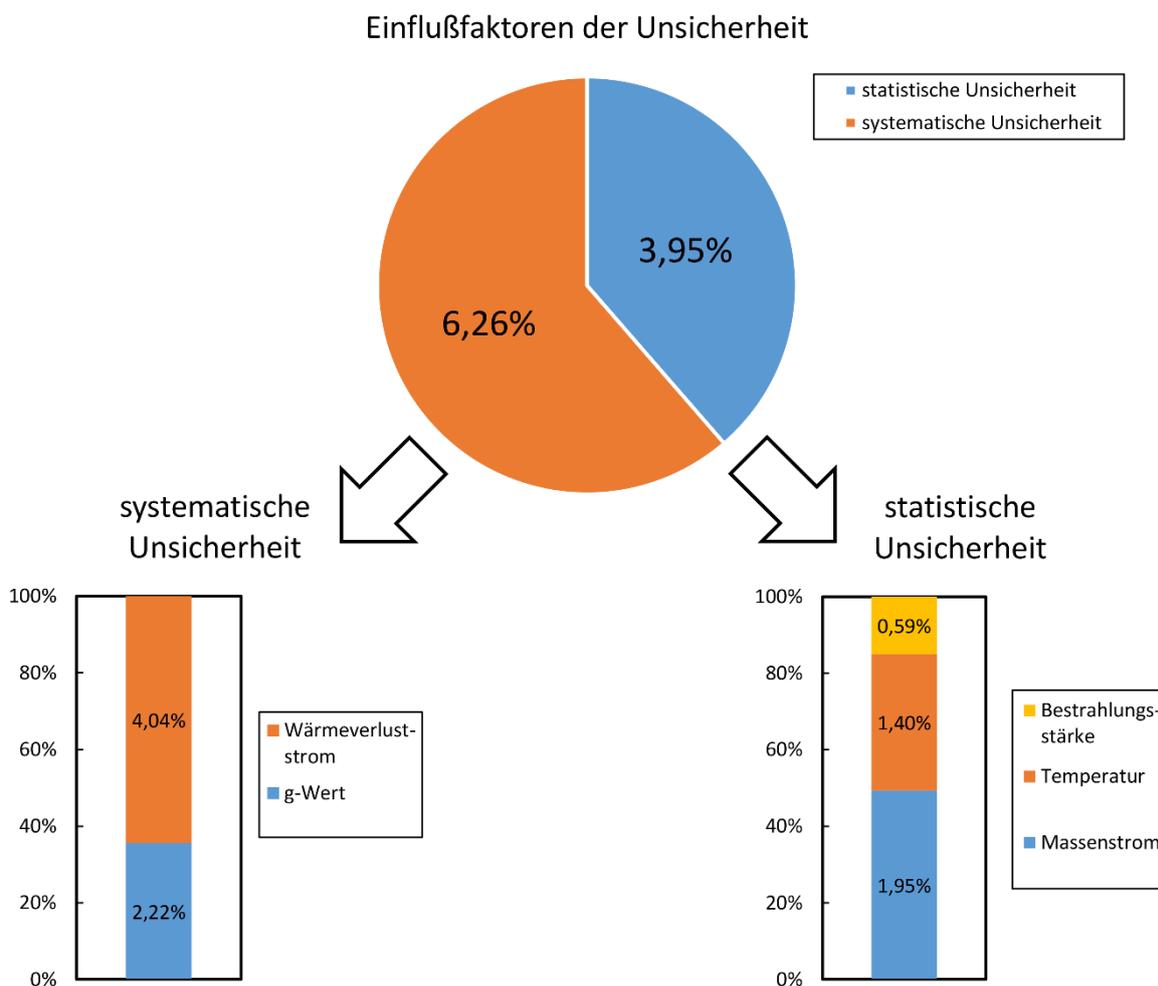
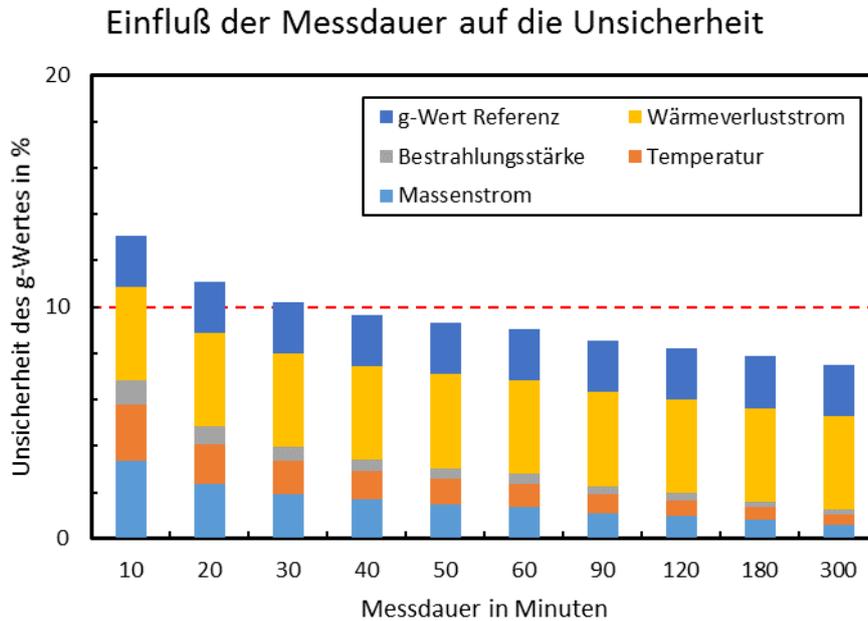


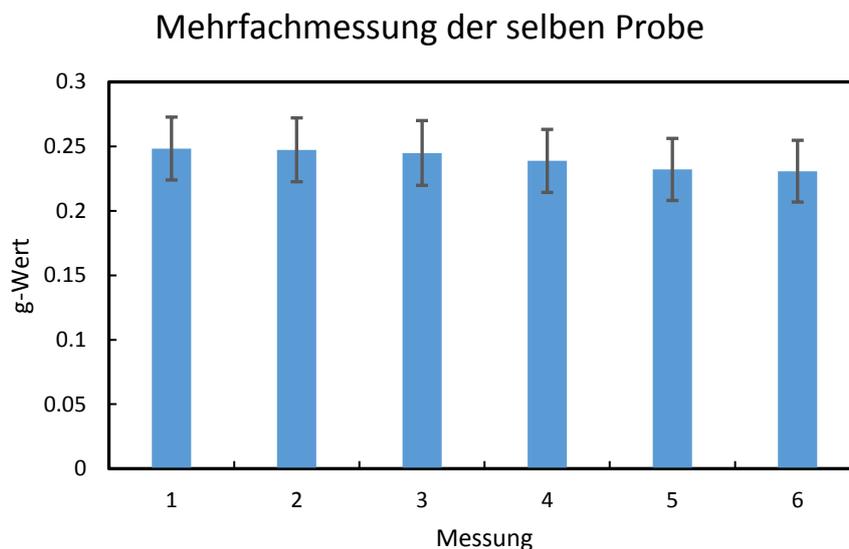
Abbildung 16: Zusammensetzung der Messunsicherheit für einer 30-minütige g-Wert Messung



**Abbildung 17: Unsicherheit des Messergebnisses mit zunehmender Messdauer**

Als Mindestanforderung an eine Messung wurde eine maximale Unsicherheit von 10 % festgelegt. In der verbesserten Betriebsweise werden die Messwerte über einen Zeitraum von 90 Minuten aufgenommen. Dies ermöglicht das Erreichen einer Unsicherheit von  $\pm 8,5$  %.

Die Ergebnisse mitsamt berechneter Unsicherheiten der Mehrfachmessung sind in Abbildung 18 dargestellt.



**Abbildung 18: Wiederholgenauigkeit der Messanlage**

Die Wiederholgenauigkeit der Messanlage und die Überschneidungen der Messungenauigkeiten sind sehr hoch. Die Validierung des Modelles ist damit erfolgreich abgeschlossen und die Messungenauigkeit der g-Wert Messanlage eindeutig bestimmt.

### Automatisierung

Das Fehlermodell und die daraus bestimmte verbesserte Betriebsweise wurden in einer Automatisierung vereint. Da der Personen Aufwand von winkelabhängigen Messungen extrem hoch ist wurde ein Konzept für eine Automatisierung der Messanlage erstellt und mit dessen Umsetzung begonnen. Diese Automatisierung erlaubt genauere Messungen von mehreren Winkeln bei geringerem personellen Aufwand, also bei reduzierten Kosten. Aufgrund der Totzeit der Messanlage von mehr als einer Minute und der Trägheit des 40 kg schweren Aluminium Absorbers rückte die Regelstrategie im ersten Schritt in den Fokus. Es wurden verschiedene möglich Regelstrategien ausgewählt und verglichen. Hierfür war die Modellierung der relevanten Bestandteile der Messanlage notwendig. Aus den Bilanzen und Differentialgleichungen wurden vereinfachte physikalische Modelle gebildet und anschließend durch Experimente kalibriert. Zuletzt wurden die Modelle bei anderen Betriebsparametern validiert. Durch dieses komplexe Vorgehen wurden Modelle erzeugt die bei allen Volumenströmen und g-Werten Gültigkeit besitzen. Um eine möglichst aussagekräftige Simulation zu erzeugen wurden neben Reglern und Modellen auch noch Störgrößen in die Simulation integriert.

Eine Kaskadenregelung konnte die besten Ergebnisse erzielen und wurde in aus diesem Grund in der Automatisierung implementiert.

### Beschleunigung des Messvorganges

Durch die Entwicklung der komplexen Kaskadenregelung konnte das Messverfahren deutlich beschleunigt werden. Die neue Regelung ist in der Lage die Messanlage deutlich schneller und präziser zu kontrollieren als das alte System. Dies ermöglicht es bei gleicher Anlagenbetriebszeit 2,5 Mal so viele Messwerte aufzunehmen im Vergleich zu den alten Verfahren. Auch wird das Regelziel deutlich präziser erreicht.

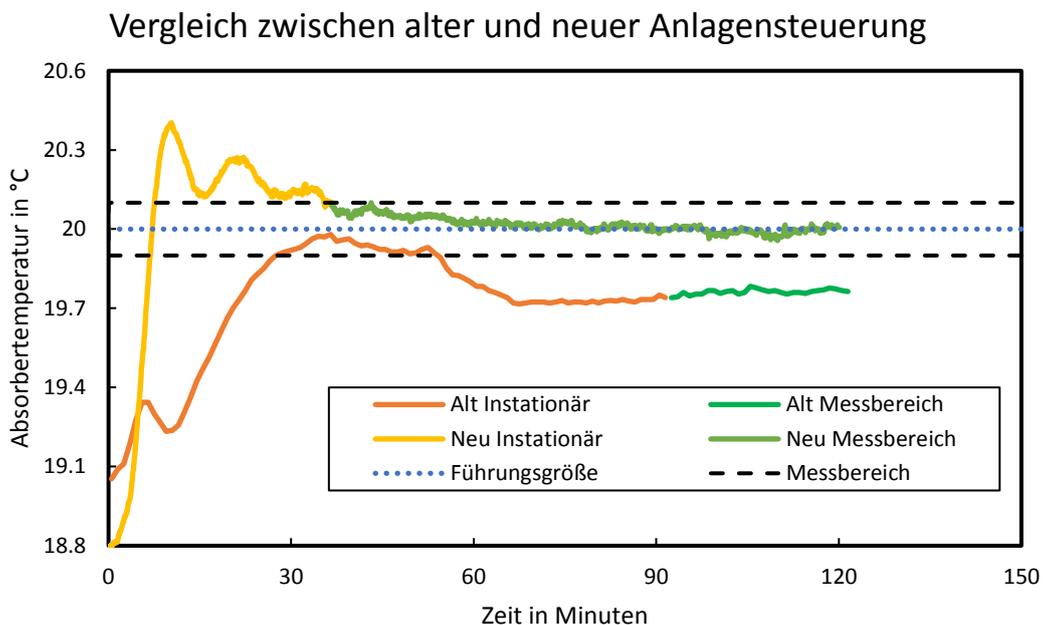


Abbildung 19: Verbesserungen im Messablauf durch die implementierte Kaskadenregelung

In Abbildung 19 ist die gleiche Messung mit der alten Anlagensteuerung und der neu entwickelten Regelung dargestellt. Die grünen Bereiche markieren die eigentliche Messung, die roten oder orangen Abschnitte stellen den Anlaufvorgang der Messanlage dar.

Die neue Regelung der Messanlage reduziert den Anlaufvorgang von 90 auf 40 Minuten und die bleibende Regelabweichung von  $\pm 0,3$  °C auf unter  $\pm 0,1$  °C.

### **Erhöhung der Genauigkeit**

Diese Reduzierung des Anlaufvorganges ermöglicht es deutlich mehr Messwerte bei gleicher Anlagenbetriebszeit aufzunehmen. Folglich wird die Messung genauer. Auch ist es möglich die Führungsgröße deutlich genauer zu erreichen und somit die Wärmeverlustströme zu reduzieren.

In lightSIMheat war nun geplant, ein simulationsgestütztes Messverfahren zu etablieren. Für die Bestimmung des winkelabhängigen g-Wertes war vorgesehen, zuerst die winkelabhängige Transmission zu messen (bei Bartenbach mit Hilfe eines umgekehrten Messverfahrens, dass eine sehr schnelle und genaue Durchführung erlaubt). Anschließend wurden einige punktuelle g-Werte für bestimmte Einfallswinkel gemessen, um dann zu einer kontinuierlichen hemisphärischen Messfläche verbunden zu werden. Dabei war geplant, mit Hilfe von thermischen Modellen und mit Hilfe der Kenntnis der optischen Funktionsweise des zu messenden Tageslichtsystems entsprechende Flächen durch die g-Wert-Messpunkte zu legen und so einen kompletten hemisphärischen g-Wert-Verlauf zu bestimmen. So haben z. Bsp. lineare Systeme (wie z. Bsp. Spiegellamellen) die Eigenschaft, dass sich die Transmissionswerte auf sogenannten Profilebenen bewegen, d.h. dass die Isolinien dieser Werte annähernd Großkreise bilden, an denen sich dann die winkelabhängigen g-Werte ‚anschießen‘.

Es stellte sich jedoch heraus, dass diese thermische Modellierung der verschiedenen Funktionsweisen zu aufwendig ist, und nicht allgemein durchführbar ist, weshalb dieses Verfahren verworfen wurde.

Stattdessen wurde ein allgemeines mathematisches Interpolationsverfahren entwickelt, das basierend auf den Isolinien g-Werte auf einem regelmäßigen Raster automatisiert ermittelt. Das Problem dabei war vor allem, dass die meisten bekannten Interpolationsverfahren für Punktwolken (= gemessene g-Werte) unbrauchbare Ergebnisse bei Punkthäufungen liefern, was die Entwicklung eines eigenen Verfahrens notwendig machte.

Dieses Messverfahrens wird derzeit noch auf der modernisierten Anlage implementiert. Dazu werden wichtige winkelabhängige Stützstellen mit der Anlage gemessen und zwischenliegende hemisphärische Werte über die Software WINDOW simulationsgestützt ergänzt, so dass sich ein geschlossener Kurvenzug für das Bauteilverhalten ergibt.

Ein Vergleich von gemessenen und in WINDOW simulierten Werten wurde ausführlich vorgenommen. Es wurden Eingabeparameter identifiziert, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Wesentliche Vorgehensweise bei der Ergänzung der Stützstellen ist die abschnittsweise Optimierung der simulierten Werte im Bereich um die Stützstellen. Dazu werden kritische Eingabeparameter an der Stützstelle intelligent justiert bis der gemessene Werte erzielt wird und auf den umgebenden Abschnitt angewendet.

## 2.1.3 Entwicklung eines in-situ-g-Wert Messgerätes

### Hintergrund und Motivation

Im Zuge der theoretischen Analyse des Messprinzips am stationären g-Wert Prüfstand über die kalorimetrische Messmethodik wurden einige Mängel festgehalten, welche die Genauigkeit der Messung beeinflussen können. Zudem wurde im Zuge des simulationsgestützten Messverfahrens überlegt, wie eine Anwendung in der Praxis sowie an bereits existierenden Gebäuden in Form einer Qualitätssicherung aussehen könnte. Ein weiterer Motivationsgrund hinsichtlich Entwicklung einer neuen Messmethodik, abweichend von bisherigen Verfahren, lag in der Möglichkeit zur verbesserten und genaueren Bereitstellung von Modellinputdaten sowie der Validierung von Simulationsmodellen.

Zunehmend komplexe Verglasungssysteme erschweren eine genaue Spezifikation der Materialien, exaktere Berechnungsmodell wie die ISO15099 oder die BSDF-Methodik erlauben zwar eine präzise Modellierung, die Verfügbarkeit der notwendigen Inputdaten zur genauen Parametrierung des Modells sind jedoch in der Praxis im gleichen Maße komplizierter und erschweren die Anwendbarkeit in der Praxis. Mit dem an der Uni Innsbruck entwickelten Messkonzept sollte zum einen ein weiterer Beitrag dazu geleistet werden, erstmals die energetische Bewertbarkeit von bereits verbauten Verglasungssystemen im Betrieb zu ermöglichen. Andererseits um die notwendigen Messdaten zur verbesserten Datengrundlage für die dynamische Simulation von Bestandsgebäuden zu liefern. Ein gezieltes Fixieren von beeinflussenden Parametern während der Messung (z.B. konvektive Übergänge) soll eine Validierung von Simulationsmodellen unter bekannten Randbedingungen ermöglichen.

In weiterer Folge sollen die so generierten in-situ Messdaten für eine Modelloptimierung verwendet werden, um ein einfaches Verglasungsmodell auf Basis eines RC-Netzwerkes durch einen Parameterfit möglichst exakt an die realen Bedingungen anzupassen, und so die Simulation auf das zu vermessende System zu optimieren. Zusätzlich wäre man dadurch unabhängiger von Modellannahmen und unsicheren Produktangaben.

### Stand der Technik: Kalorimetrisches Verfahren

Für stationäre g-Wert Messung hat sich das kalorimetrische Messverfahren etabliert. Die Einstrahlungsleistung, meist von einer künstlichen Lichtquelle aufgebracht, durchtritt den Prüfling abhängig vom Gesamtenergiedurchlassgrad über Transmission und sekundären Wärmetransport. Innerhalb einer möglichst adiabatisch geführten Klimakammer wird die dissipierte Energie von einem (idealen) Absorber aufgenommen und über einen Kühlkreislauf abgeführt. Die abgeführte Energiemenge in Relation zur eingestrahelten Energiemenge ergibt den stationären g-Wert als Messgröße.

Trotz klarer Definition der Versuchsdurchführung und der Randbedingungen etwa die erst kürzlich veröffentlichte Norm ISO/DIS 19467, limitieren physikalisch bedingte Einflussfaktoren die erreichbare Messgenauigkeit durch:

- auftretende Randverluste (Wärmeströme über den Verglasungsrand und die Kammernisolation)
- Abweichung vom ideal schwarzen Absorber
- ungenau bestimmte konvektive Wärmeübergänge (häufig mit inhomogener Verteilung über die Fläche) vor und hinter dem Prüfling
- Abweichung der Einstrahlung vom solaren Spektrum

Analysen mit Hilfe der Fehlerfortpflanzungsrechnung anhand eines konventionellen g-Wert Messstandes haben gezeigt, dass durch die angeführten Einflussfaktoren der gemessene Messwert bis zu 15% vom tatsächlichen abweichen kann. Anhand des in-situ Messprinzips sollen die oben genannten Fehlereinflüsse durch das umgesetzte Konzept mit folgenden Maßnahmen gezielt unterbunden werden können:

- Randverluste unterbinden durch Schutzring
- Ersetzen des Absorbers durch eine Wärmeflussmessplatte (direkte Messung anstelle der kalorimetrischen Messung mittels „guarded hot box“)
- Unterbindung der Konvektion durch Minimierung des Luftspaltes zwischen raumseitiger Verglasung und Wärmeflussmessplatte
- Messung unter realer Solarstrahlung

### In-situ Messkonzept

Das entwickelte Messverfahren (Abbildung 20) setzt sich aus zwei Komponenten zusammen:

- Wärmeflussmessung mittels temperaturregulierter Plattenapparatur durch Peltierelemente
- Transmissionsmessung mittels vertikal verfahrbarer kurzgeschlossener PV-Zelle, welche für die Solarstrahlungsmessung kalibriert wurde

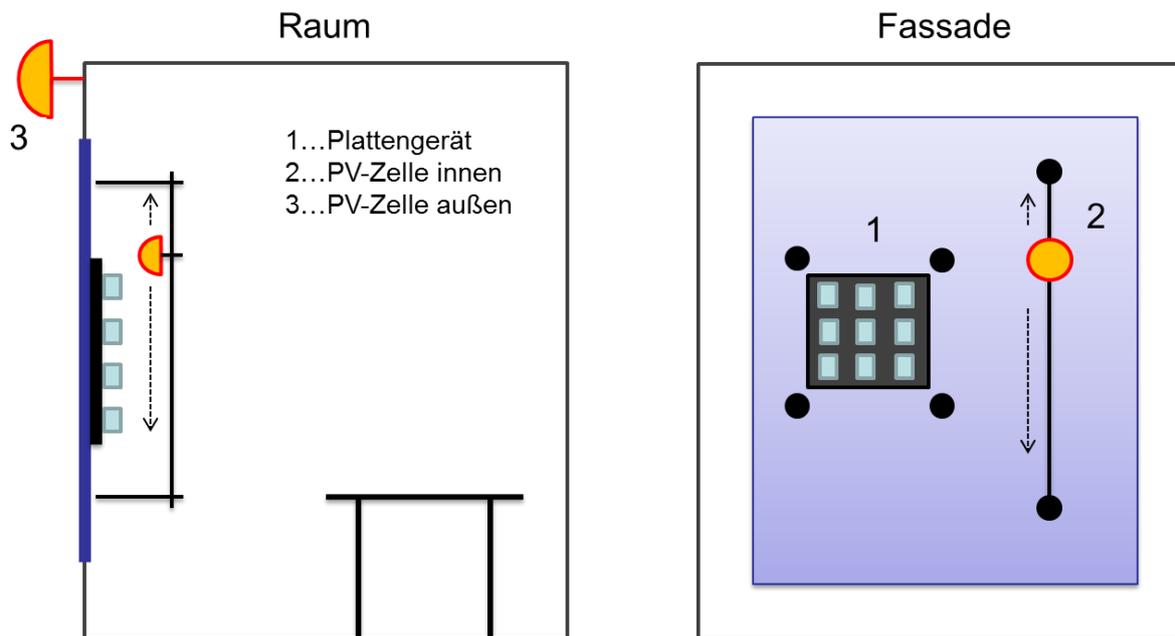


Abbildung 20: Schematische Darstellung des Messprinzips der in-situ Messung

Das Messprinzip orientiert sich an der physikalischen Zusammensetzung des g-Wertes aus Transmission und sekundärer Wärmeabgabe. Während bei einer kalorimetrischen Messung meist der summierte g-Wert (Transmission und sekundärer Wärmeabgabegrad) ermittelt wird, können mit diesem Verfahren beide Anteile getrennt voneinander bestimmt werden. Dies hat insbesondere Vorteile bei der Validierung von Simulationsmodellen, da diese ebenso mit getrennten Algorithmen für die Berechnung von Transmission und sekundärer Wärmeabgabe arbeiten.

Im Vergleich zur kalorimetrischen Messung basiert das in-situ-Messprinzip auf der direkten Messung des Wärmestromes durch die Verglasung mittels Wärmestrommessplatte. Die absorbierte Solarstrahlung an der Messplatte würde ein sofortiges Aufheizen der Plattenapparatur verursachen und die Messung unbrauchbar machen. Um das zu verhindern wird die gesamte Plattenapparatur rückseitig über Peltier-Elementen gekühlt und auf diese Weise temperaturgeregelt. Für die Ermittlung der solaren Transmission sind zwei PV-Zellen vorgesehen, welche jeweils innerhalb und außerhalb der zu vermessenden Verglasung angebracht sind.

Die Temperaturregelung der Plattenapparatur erfolgt durch zwei unabhängige Regelkreise (T1/T2 in Abbildung 21). In einem ersten Schritt wird die Oberflächentemperatur der Wärmeflussmessplatte auf die Raumtemperatur geregelt. Die Messung der Plattentemperatur erfolgt an der Oberseite der Wärmestrommessplatte, da eine präzise Temperaturmessung direkt an der Verglasung aufgrund der Erwärmung durch Absorption der solaren Einstrahlung nicht möglich ist. Mit Hilfe der bekannten thermischen Leitwerte von Wärmeflussmessplatte und Luftschicht kann ausgehend vom gemessenen Temperaturpunkt und Wärmestrom auf die innere Verglasungstemperatur rückgerechnet werden. Dieser Ergebniswert geht in die Regelung ein und wird möglichst exakt der gemessenen Raumtemperatur nachgeregelt. In einem zweiten Schritt wird der Schutzring eingeregelt, sodass sich der Temperaturunterschied - und damit die auftretenden Wärmeströme - zwischen Kernelement und Randzone zu Null ergeben. Erst dann ist sichergestellt, dass kein unkontrollierter seitlicher Wärmeabfluss auftritt und so zu einem Messfehler führt. Der Abstand von Messapparatur zur Verglasungsoberfläche muss so gering gewählt sein, dass freie Konvektion unterbunden wird, gleichzeitig aber direkter Kontakt ausgeschlossen ist.

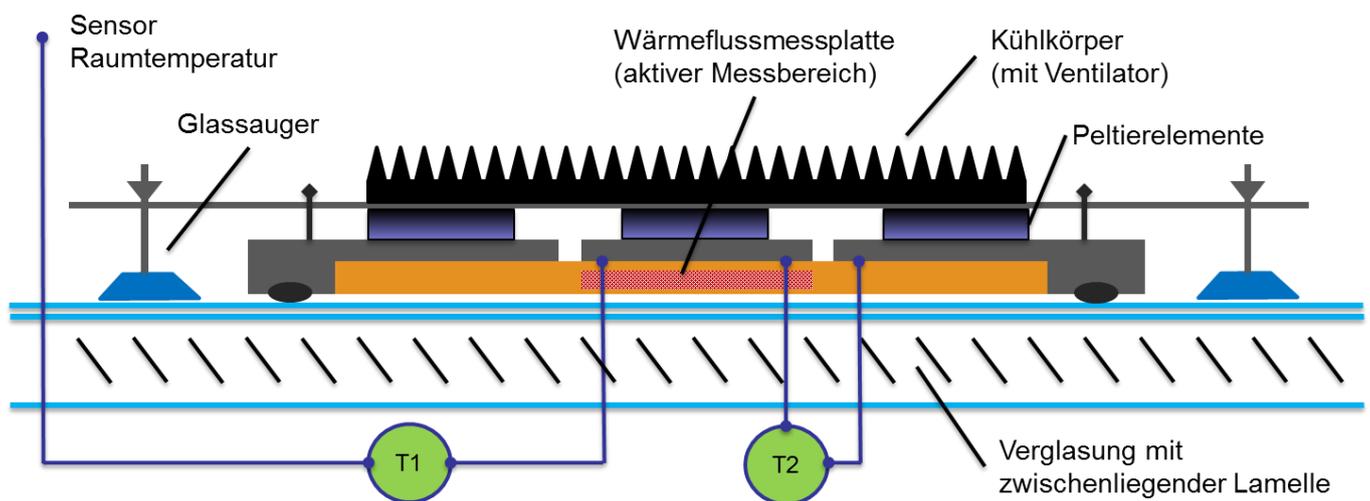
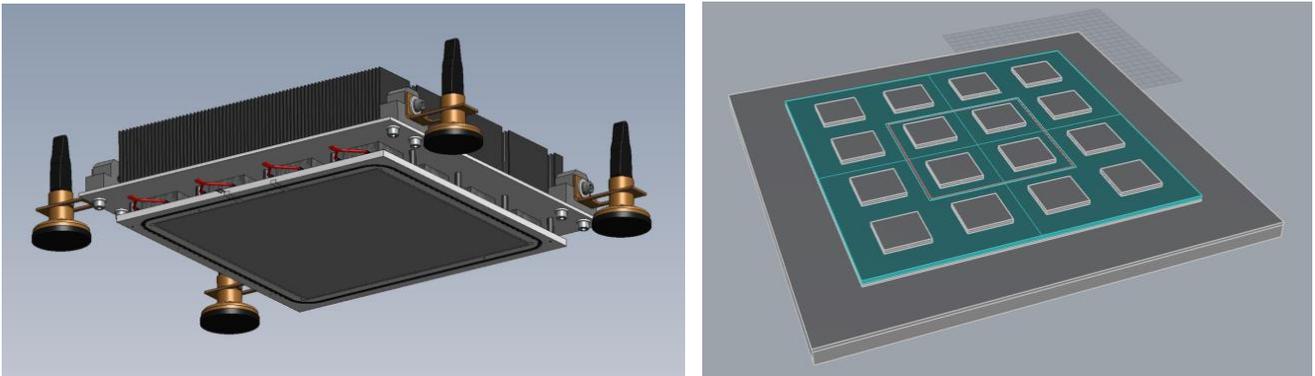


Abbildung 21: Schematische Prinzipskizze der Plattenapparatur

An dieser Stelle ist anzumerken, dass es nicht Ziel des Messprinzips ist, eine normgerechte g-Wert Messung durchzuführen. Vielmehr sollen klare Randbedingungen während der Messung geschaffen werden, welche später im Modell direkt übernommen werden können.

## Prototypenfertigung

Ausgehend von den konzeptionellen Ideen zum Design des Plattenapparates wurde in Zusammenarbeit mit der Firma Taurus Instruments ein erster konstruktiver Entwurf erstellt (Abbildung 22, links). Die bauphysikalischen Kriterien lieferte die Universität Innsbruck, die Auswahl der Materialien und die mechanische Ausführung erfolgte durch die Fa. Taurus in Absprache.



**Abbildung 22: Konstruktionsentwurf der Plattenapparatur (links), vereinfachtes Geometriemodell für die thermische Analyse (rechts)**

Der konstruktive Entwurf wurde durch FE-Simulationen wissenschaftlich begleitet, um folgende Aspekte anhand eines theoretischen Modells sicherzustellen:

- Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung
- Notwendige Kühlleistung abhängig von variabler Einstrahlleistung (Dimensionierung der Peltiers)
- Optimierte Beaufschlagung der einzelnen Peltier-Elemente (Kern-/Eck-/Randbereich)
- Plausibilitätsprüfung des Messprinzips

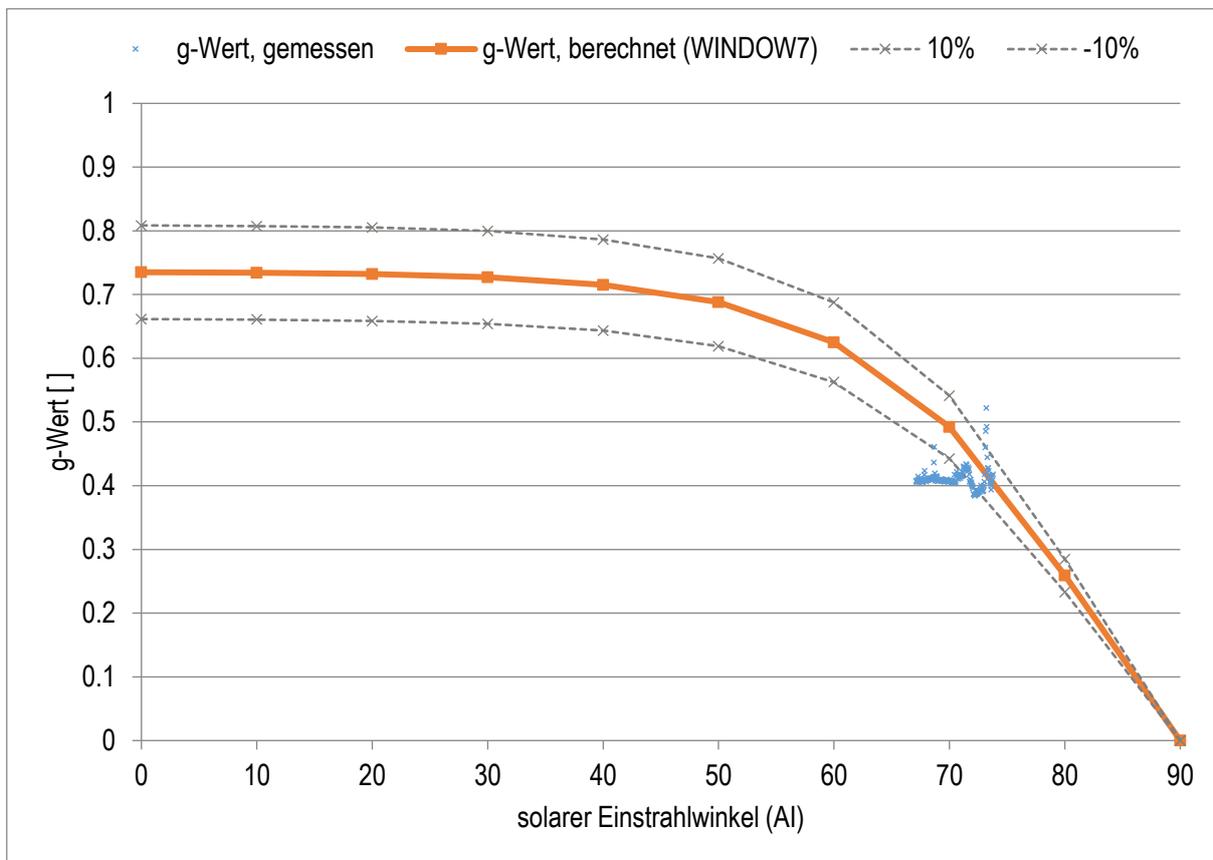


**Abbildung 23: Geräteinstallation für Testmessungen**

### Erste Messergebnisse

Für eine erste Testmessung wurde das Gerät bei der Fa. Taurus an einer südorientierten Büroraumverglasung (Zwei-Scheiben Isolierverglasung im low-e Schicht) erstmals installiert und über mehrere Stunden (11:00 – 14.00) Messdaten aufgenommen (Abbildung 23).

Stark streuende Messpunkte aufgrund bewölkten Zustand wurden aus der Messwolke entfernt. Verglichen mit theoretischen Berechnungswerten aus WINDOW zeigt sich hier bereits eine sehr gute Übereinstimmung, wobei sich deutlich ein konstanter Anteil (unabhängig vom Einstrahlwinkel) ausbildet, was durch den diffusen Einstrahlungsanteil begründet werden kann (Abbildung 24).



**Abbildung 24: gemessener in-situ g-Wert in Abhängigkeit des solaren Einstrahlwinkels (Vergleich mit theoretischem g-Wert)**

Die Umsetzung der flexiblen Transmissionsmessung sowie von genaueren Validierungsmessungen erfolgt im Zuge eines bereits laufenden Folgeprojektes. Ebenso sind bereits parallele Messungen zur kalorimetrischen Methode im g-Wert Prüfstand geplant (Cross-Check). Die zur Verfügung gestellten Referenzgläser der SFL (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) werden hierzu ebenso für eine genaue Validierung des Messgerätes herangezogen. Danach ist bereits eine erste reale Anwendung zur Qualitätssicherungen der verbauten Verglasung an einem Neubau in Innsbruck geplant (Q2/2017). Langfristig wird eine Optimierungsmethodik umgesetzt, anhand der vereinfachte Verglasungsmodelle in der dynamischen Gebäudesimulation (RC-Netzwerke) mit in-situ Messdaten auf reale Bedingungen hin optimiert werden können.

## 2.2 Lichttechnische Modellierung

Im Arbeitspaket zur lichttechnischen Modellierung erfolgte zunächst eine vertiefte Beschäftigung mit einem neuen Konzept zur Charakterisierung von Tageslichtsystemen. In RADIANCE wurden "variable resolution BSDFs" eingeführt, die eine wesentlich genauere Beschreibung der lichttechnischen Eigenschaften von Systemen ermöglichen. Statt einer starren Diskretisierung mit 145 x 145 Patches nach der Definition von Klems, erlaubt diese Methode eine prinzipiell beliebig feine Unterteilung, wobei die dabei entstehende Datenmenge nachträglich effizient mit möglichst geringem Informationsverlust reduziert wird (grobe Auflösung für „glatte“ Bereiche und feine Auflösung für „Spitzen“ in der BSDF). Dieser Ansatz wurde im Detail getestet und mit den bestehenden Methoden und analytischen Modellen verglichen.

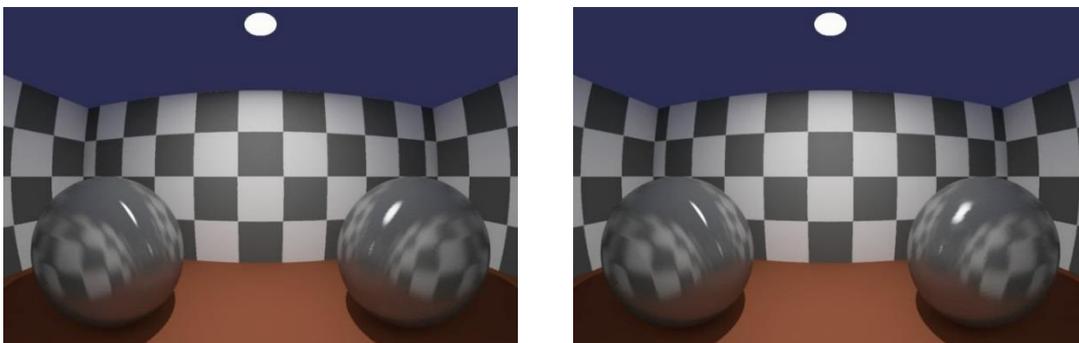


Abbildung 25: Vergleichende Darstellung unterschiedlicher BSDF Auflösungen

Die jeweils linke Kugel in Abbildung 25 ist mit einem analytischen Modell für metallische Oberflächen simuliert, die jeweils rechte Kugel mit dem datenbasierten BSDF-Ansatz mit variabler Auflösung (max. Auflösung der BSDF 4096 x 4096 Patches). Das linke Bild zeigt den Vergleich ohne Datenreduktion, das rechte mit 99% Datenreduktion.

Einen grundsätzlich neuen Ansatz zur Berücksichtigung von lichtlenkenden Systemtechnologien in RADIANCE bietet das „Photon Mapping“ Verfahren, das seit 2015 Teil der offiziellen RADIANCE-Distribution ist. Dafür wurden in engem Kontakt mit den Programmautoren Greg Ward (RADIANCE) und Roland Schregle (Photon Map) allgemeine Tests der Softwareerweiterung durchgeführt und die Erfahrungen in Vorträgen präsentiert und diskutiert.

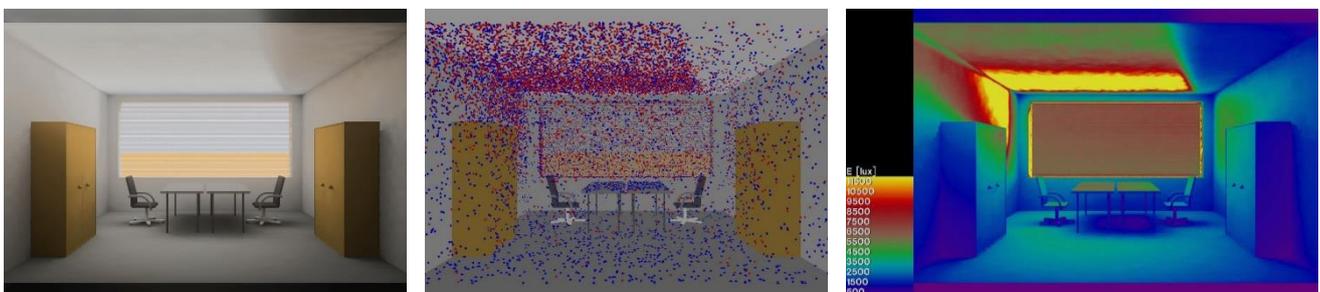
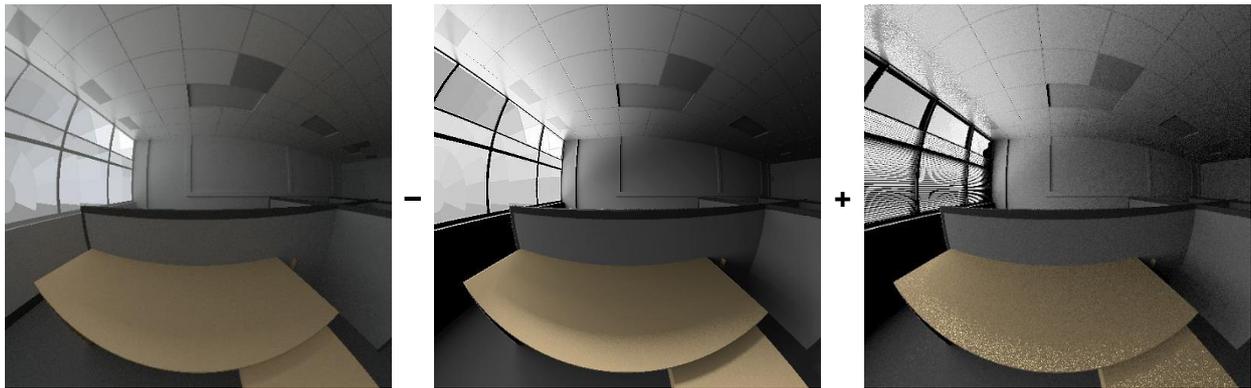


Abbildung 26: Beispiel einer Simulation mit der Photon Mapping Erweiterung in Radiance: Rendering des Referenzraums mit tageslichtlenkender Lamelle (links), Photonverteilung im Raum (Mitte), resultierende Beleuchtungsstärken im Raum (rechts)

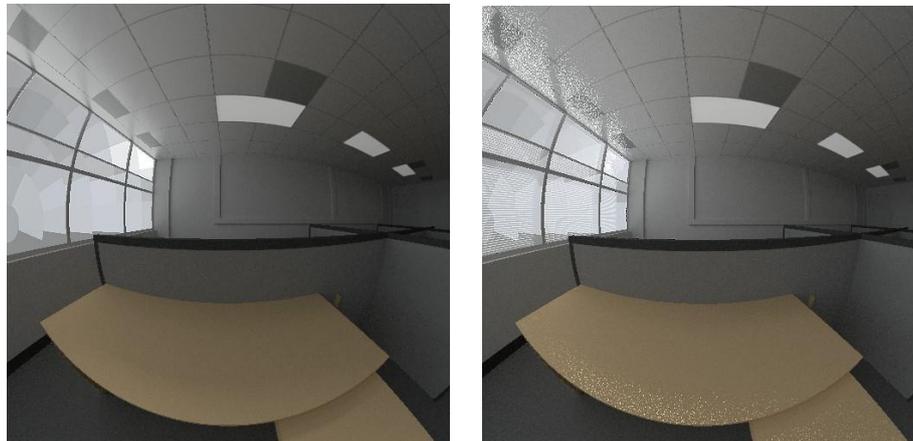
Die Beschäftigung mit der Photon Mapping Erweiterung zeigte deutlich das Potenzial der direkten Berücksichtigung komplexer optischer Systeme in der Simulation (Abbildung 26). Gleichzeitig stellte sich aber auch heraus, dass die Anforderungen für die Einbindung in eine gekoppelte Simulation nur sehr eingeschränkt erfüllt werden können. Durch den Verzicht auf BSDFs kann das Fassadensystem nicht für jeden Zeitschritt getauscht werden während die View- und Daylightmatrix der Three-Phase Method gleichbleiben. Daher müsste in jedem Zeitschritt eine volle Raumsimulation durchgeführt werden, was aber nicht mit vernünftigen Berechnungszeiten realisierbar ist.

Im Laufe der vergangenen Jahre wurden Methoden und Tools entwickelt, die eine Charakterisierung von optisch komplexen Tageslicht- und Sonnenschutzsystemen und deren Einbindung und damit Evaluierung in Simulationsprogrammen ermöglichen. Die „RADIANCE Three-Phase-Method“ (3-PM) erlaubte erstmals schnelle und effiziente Ganzjahres-Tageslichtsimulationen mit Fassadensystemen (Ward, 2007). Diese Methodik wurde anhand von Messdaten validiert (McNeil und Lee, 2013) und im Vorgängerprojekt „LichtAusFassade“ bereits in einer ersten Version erfolgreich eingesetzt. Ein Nachteil der 3-PM ist die ungenaue Abbildung des direkten Sonnenanteils bedingt durch die Mittelung über – verglichen mit der Größe der Sonne – große Raumwinkelbereiche. Dadurch können vor allem bei stark winkelselektiven Systemen große Fehler in der Berechnung auftreten und speziell die Auswertung des visuellen Komforts beeinflussen. Mit der „RADIANCE Five-Phase-Method“ (5-PM) wurde von McNeil eine Erweiterung eingeführt um den direkten solaren Beitrag deutlich verbessert zu berücksichtigen (McNeil, 2013). Wesentlicher Bestandteil dabei ist der Austausch der groben Klems-Diskretisierung der BSDF des Fassadensystems in der 3-Phasen-Methode durch eine fein diskretisierte, hochaufgelöste BSDF und – sofern vorhanden – die Systemgeometrie für die Berechnung des direkten Sonnenanteils (vgl. oben Validierung dieses Ansatzes).

In der von McNeil vorgeschlagenen Erweiterung wurden jedoch nicht alle notwendigen Anpassungen durchgeführt. So werden etwa Leuchtdichten an der Fassade (d.h. bei direktem Blick an das Fassadensystem) weiterhin über die grobe Unterteilung erfasst. Dadurch kann z.B. die Blendungsbewertung nicht verbessert werden, da hier die Helligkeiten an der Fassade maßgeblich sind. Daher wurde der Algorithmus der 5-PM erweitert um auch solche Bewertungen der visuellen Qualität in deutlich verbesserter Qualität zu ermöglichen. Dafür ist ein weiterer Simulationsschritt notwendig, in dem zusätzlich zum direkten Sonnenanteil im Raum (z.B. „Sonnenflecken“) auch der direkte solare Anteil direkt am Fassadensystem (d.h. hohe Helligkeiten z.B. auf der Lamelle) mit einer hochaufgelösten BSDF und der Systemgeometrie berechnet wird. Dieser Anteil wird dann im Ergebnis der 3-PM ersetzt und somit deutlich detaillierter abgebildet.



**Abbildung 27: Schematischer Ablauf der adaptierten Five-Phase-Method: Three-Phase-Method VTDS (links); Direktanteil der Three-Phase-Method  $V_d T D_d S_{ds}$  (Mitte); hochaufgelöster Direktanteil der Five-Phase-Method  $(C_{R-ds} + C_{F-ds}) S_{sun}$  (rechts)**



**Abbildung 28: Vergleich Three-Phase Method und Five Phase Method**

Abbildung 28 zeigt einen Vergleich des resultierenden Renderings bei Verwendung der Three-Phase-Method (links) und der Five-Phase-Method (rechts). Wesentliche Unterschiede erkennt man an den Figurationen des umgelenkten Tageslichts an der Decke (klarere Schattengrenzen) sowie vor allem an der Verglasung selbst, wo die hohen Leuchtdichten der Sonne nicht mehr auf große Bereiche aufgeteilt werden.

### 2.3 Thermische Modellierung

Im Arbeitspaket der thermischen Modellierung wurde Algorithmen zur thermischen Abbildung von komplexen Fassadensystemen in der dynamischen Gebäudesimulation erarbeitet, vorhandene Modelle optimiert und gegen Messdaten (stationär und dynamisch) validiert. Im vorliegenden Kapitel sind die wesentlichen Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

Die thermische Modellierung komplexer Verglasungssysteme kann auf Basis der physikalischen Vorgänge in einen ersten Teil der kurzwelligigen Strahlungsmodellierung (optisch) und in einen zweiten Teil der langwelligigen Strahlungsmodellierung (thermisch) unterteilt werden (Abbildung 29).

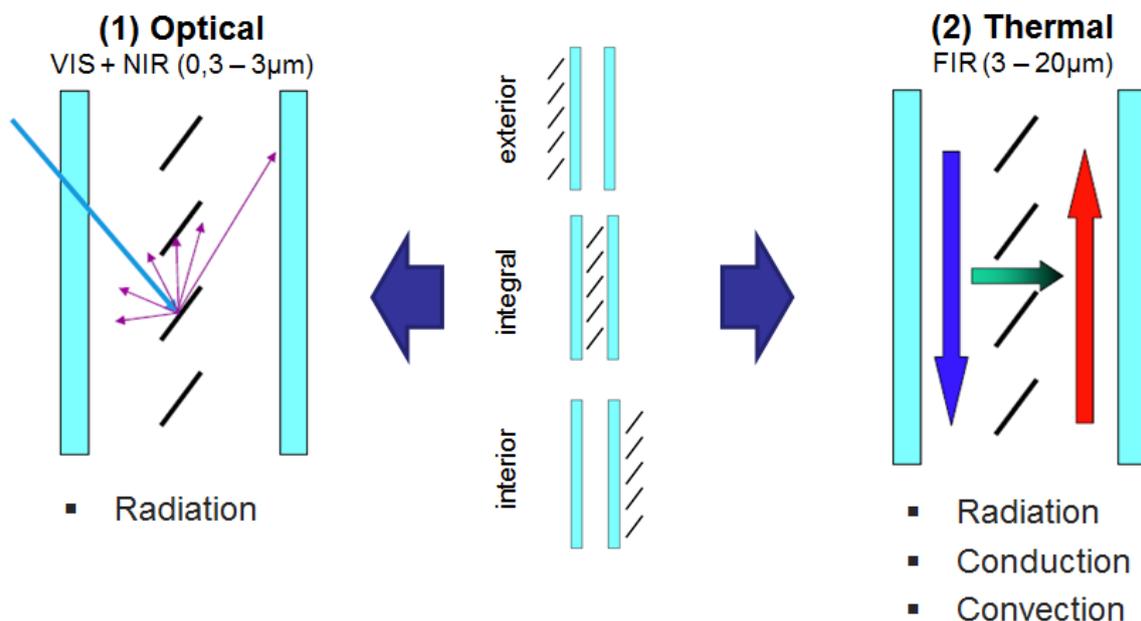


Abbildung 29: Physikalische Auftrennung der thermischen Modellierung von CFS

Zusätzlich kann in der Umsetzung der Modellierung zwischen dem Ansatz einer detaillierten „layer-by-layer“- Betrachtung auf Basis physikalischer Prinzipien oder dem eines *parametrierten Modellierungsansatzes* unterschieden werden. Ersterer verlangt eine sehr genaue Beschreibung der einzelnen Systemkomponenten (Verglasung, Verschattungslamelle), während mit dem letzteren Ansatz eine vereinfachte Modellierung auf Basis von bereits vorberechneter Kennwerte des Gesamtsystems erfolgen kann. Die Vorberechnung beinhaltet fix definierte Randbedingungen und erlaubt somit keine Interaktion mehr zwischen den beteiligten Komponenten (Verglasungen, Lamelle...). Der reduzierte Modellierungsaufwand im Zeitschritt geht damit auf Kosten der Auflösungsgenauigkeit der Modelle, da die Ergebnisse zu einem Teil an (statische) Vorannahmen gekoppelt sind.

Im Zuge des Vorprojektes „LichtausFassade“ wurde bereits Ansätze für solche parametrisierten Modelle (g- Modell, Abs-Modell, Fc-Modell) zur vereinfachten Abbildung von Verschattungssystemen in der dynamischen Gebäudesimulation umgesetzt. Diese Modelle wurden in lightSIMheat weiter verbessert und gegen das detaillierte Simulationsmodell nach ISO15099 mit integrierten BSDF-Daten validiert.

### 2.3.1 Vereinfachte Modellansätze

Entsprechend der physikalischen Definition des g-Wertes (2) erfolgt in allen drei vereinfachten Ansätzen eine Auftrennung der in den Raum eingebrachten Solarstrahlung in einen kurzwelligen Anteil (transmittierte Strahlung) und in einen langwelligen Anteil (sekundäre Wärmeabgabe). Letzterer unterteilt sich dabei nochmals in einen Anteil für langwellige Wärmestrahlung und einen Anteil für konvektive Wärmeabgabe direkt an die Raumluft.

$$g - \text{Wert} = \tau + q_{sec} \quad (2)$$

Die aufgetrennten Strahlungsanteile werden durch die parametrisierten Modelle außerhalb des Gebäudemodells berechnet und im Zeitschritt als „gain“ übergeben. Die transmittierte Strahlung (airgain) wird dabei dem Luftknoten der thermischen Zone aufgeprägt, die sekundäre Wärmeabgabe (wallgain) wird als Energie direkt auf die Glasscheibe des konventionellen Fenstermodells in Type56 aufgeprägt. Das reguläre Fenstermodell bleibt im g- und Abs- Modell ständig verschattet, im Fc- Modell fungiert es als Parameter.

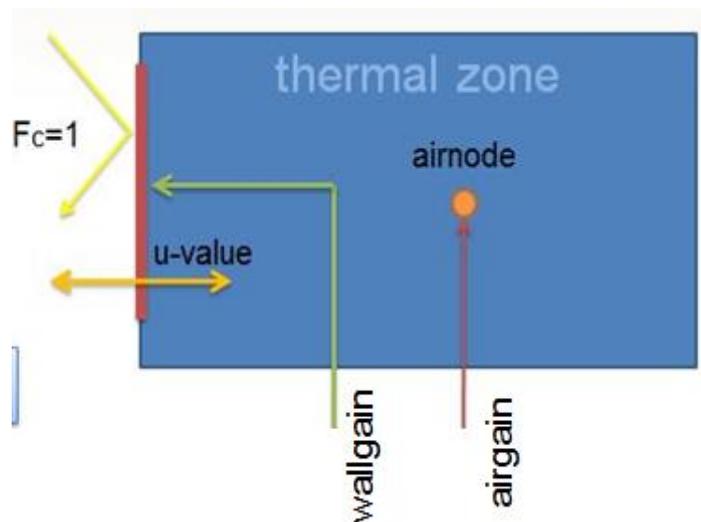


Abbildung 30: Ankopplung an das th. Raummodell

Der „wallgain“ entspricht der absorbierten Strahlung in der Verglasung (inkl. Lamelle) und erhöht die Scheibentemperatur, welche wiederum über U-Wert der Verglasung (Wärmeleitung), Konvektion und langwelliger Abstrahlung mit den umgebenden Flächen im Raum in Austausch steht. Die Berechnung der Strahlungsanteile erfolgt separat für den Direkt- und Diffusstrahlungsanteil. Letzterer wird nochmals getrennt berechnet für diffuse Himmels- und Bodenstrahlung. Während die Inputwerte für Direktstrahlung getrennt für jede diskretisierte Einstrahlrichtung als zweidimensional-abhängige Wertematrix für g-Wert, Transmission (Gesamtsystem) und Absorption (pro Schicht) vorliegen müssen (2D-Winkelabhängigkeit), ist nur je ein Diffuswert pro Lamellenstellung und hemisphärischen Anteil notwendig. Diese Konvention ist kompatibel zur der ausgearbeiteten Kennzahldefinition für komplexe Verglasungen in Kapitel 3.1.1.

Für die Diskretisierung der Modellinputdaten können zwei unterschiedliche Rasterformate verwendet werden. In lightSIMheat wurden dazu ein konstantes Raster mit je 5°-Abrasterung für den Azimuth (0-360°, Umlaufwinkel der Hemisphäre) und den Zenith (0-90°, Höhenwinkel der Hemisphäre) umgesetzt (Abbildung 31, links). Durch das entwickelte, simulationsgestützte Messverfahren aus Kapitel 3.1.2 können so die notwendigen Inputdaten für die Berechnungsmodelle zur Verfügung gestellt werden. Zusätzlich ist es noch möglich, mit einer Diskretisierung der Inputdaten nach Klems zu arbeiten (Abbildung 31, rechts).

Bei komplexen Lamellensystemen (hochreflektieren, komplexe Geometrien) oder kritischen Lamellenstellungen (Cut-Off, Retro) kann das hochaufgelöste Raster präzisere Ergebnisse liefern aufgrund der kleineren Sonnenpunkte. Das Klems-Raster bietet allerdings den großen Vorteil der internationalen Standardisierung und ermöglicht somit Kompatibilität mit anderen Tools für das Daten-Preprocessing (z.B. WINDOW7).

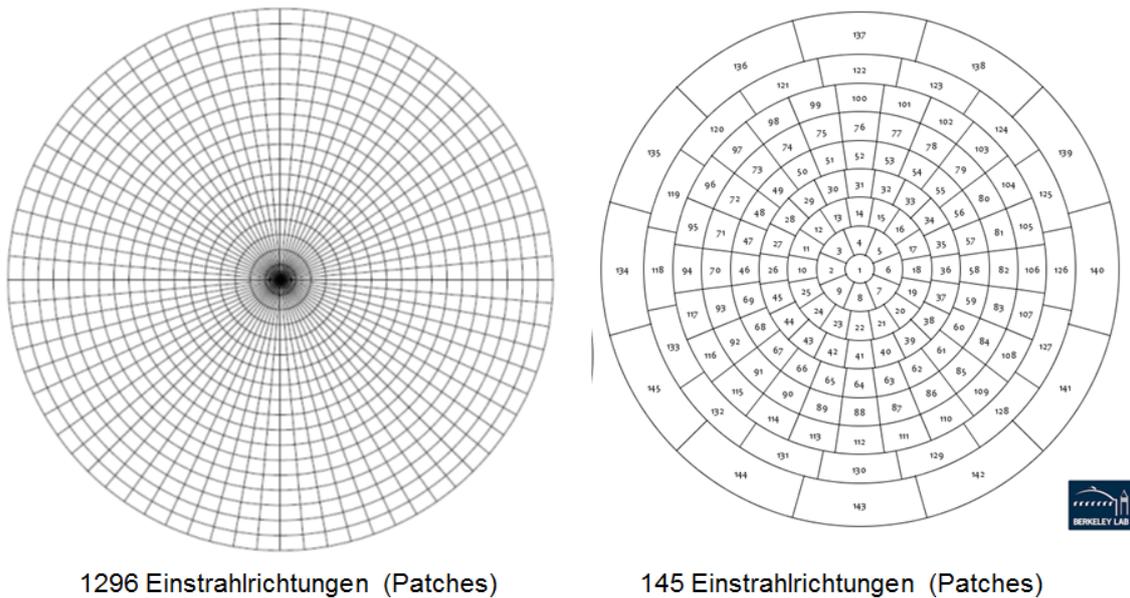
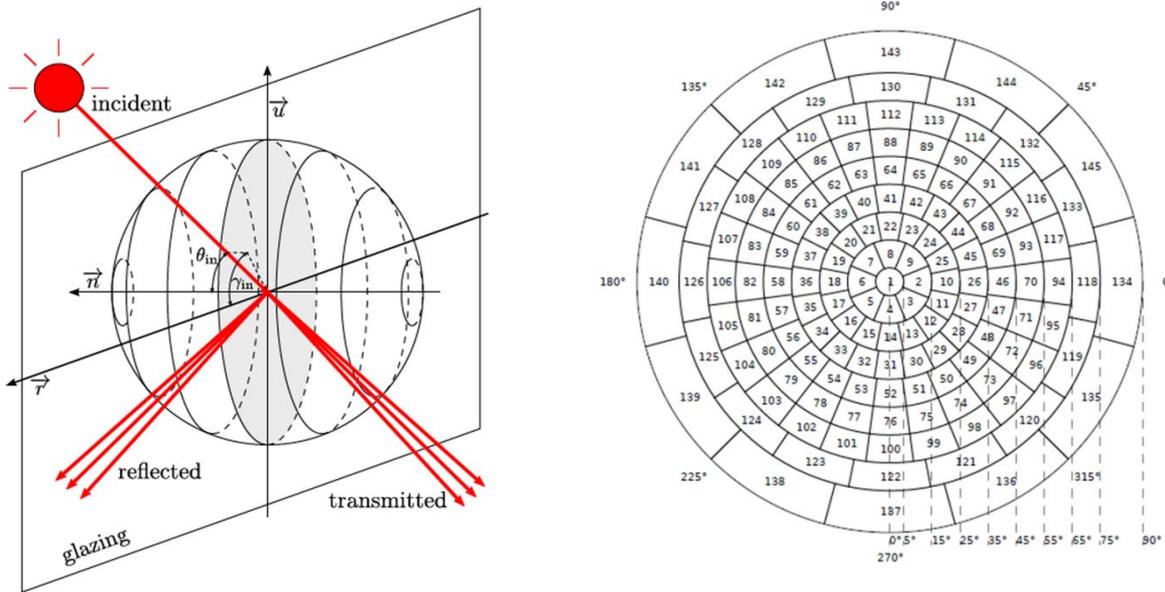


Abbildung 31: Modellinputdaten über hochaufgelöstes Raster (li) und standardisiertes Klems-Raster (re.)

### 2.3.2 Detaillierte physikalische Modellierung von CFS nach ISO15099 und BSDFs

Das physikalische Modell nach den Algorithmen der ISO15099 (EN ISO 15099) und den implementierten BSDF-Daten bietet den höchsten Detaillierungsgrad der verfügbaren Modelle und bildete die Basis für Validierungszwecke der vereinfachten Ansätze. Beim BSDF-Modell basieren die Modellierung der kurzwelligen Strahlung auf den BSDF-Daten des Gesamtsystems (Abbildung 32) und die thermische Modellierung auf einem geometrischen Modell mit den zugehörigen physikalischen Algorithmen nach ISO15099 (Radiosity-Verfahren). Die ISO15099 erlaubt auch eine kurzwellige Strahlungsmodellierung auf Basis des geometrischen Lamellenmodells nach dem Radiosity-Verfahren. Trotz dem Vorteile der Möglichkeit zur raschen Geometrieanpassung ist das Verfahren eingeschränkt auf diffus reflektierende Systeme mit konventioneller (plan, gekrümmt) Lamellengeometrie, weshalb der kurzwellige Modellierungsanteil durch BSDF-Daten ersetzt wurde.



**Abbildung 32: Kurzwellige Strahlungsmodellierung mit solaren BSRF-Daten**

In Kooperation mit der Fa. Transsolar Energietechnik wurde das neu umgesetzte Modell durch (Hiller und Schöttl 2014) dem Projektkonsortium zum Testen, validieren und weiterentwickeln zur Verfügung gestellt. Die erste beta-Version wurde als kompilierte Version des externen Modells (Type330) in eine Jahressimulation integriert und getestet. In einem ersten Schritt wurde dieses Modell durch statische Vergleichsrechnungen gegen das Berechnungstool WINDOW7 verglichen. Die Ergebnisse zeigten Abweichungen, welche durch Einbindung zusätzlicher thermischer Parameter (siehe Kapitel 3.3.3) korrigiert werden konnten. Nach erfolgreicher Optimierung erfolgte die dynamische Vergleichsrechnung gegen EnergyPlus (v8.0). Hierzu konnte dann eine sehr gute Übereinstimmung für mehrere Varianten an komplexen Verglasungssystemen (außenliegend, integriert, hochverspiegelt) gezeigt werden. Die Ausarbeitung erfolgte im Detail durch die Masterarbeit von Christian Kofler (*Titel: Vergleich der Modelle zur Abbildung komplexer Verglasungssysteme in der thermischen Gebäudesimulation mit TRNSYS 17 und ENERGY PLUS 8.0*) am Institut für Energieeffizientes Bauen der Uni Innsbruck.

Nach Abschluss dieser Validierung erfolgte ein Vergleich der vereinfachten Modellansätze gegen das komplexe Modell. Die Unterschiede in den Ergebnissen wurden analysiert und Anwendungsempfehlungen für und Einsatzgrenzen für die vereinfachten Modelle ausgearbeitet.

### 2.3.3 Definition des langwelligen Strahlungsaustausches von CFS Layer

Die Modellierung des langwelligen Strahlungsaustausches zwischen den einzelnen Layer des Verglasungssystems (Gläser, Lamellen) ist in der ISO15099 in Form einer detaillierten Energiebilanz durch Wärmestrahlung, Wärmeleitung und Konvektion ausgearbeitet (32, rechts). Diese ist im Simulationszeitschritt iterativ zu lösen und berechnet alle Oberflächentemperaturen sowie die transmittierte Energie. Verglasungen sind aufgrund des opaken Verhaltens im langwelligen Bereich durch ihre Emissions- und Reflexionsgrade eindeutig bestimmt. Hingegen weisen Lamellen im Vergleich dazu Durchlässigkeit für Infrarotstrahlung im Lamellenzwischenraum auf. Zudem sind der effektive Emissivitätsgrad des Lamellenlayers sowie dessen konvektives Verhalten stark an die aktuelle Lamellenstellung gekoppelt.

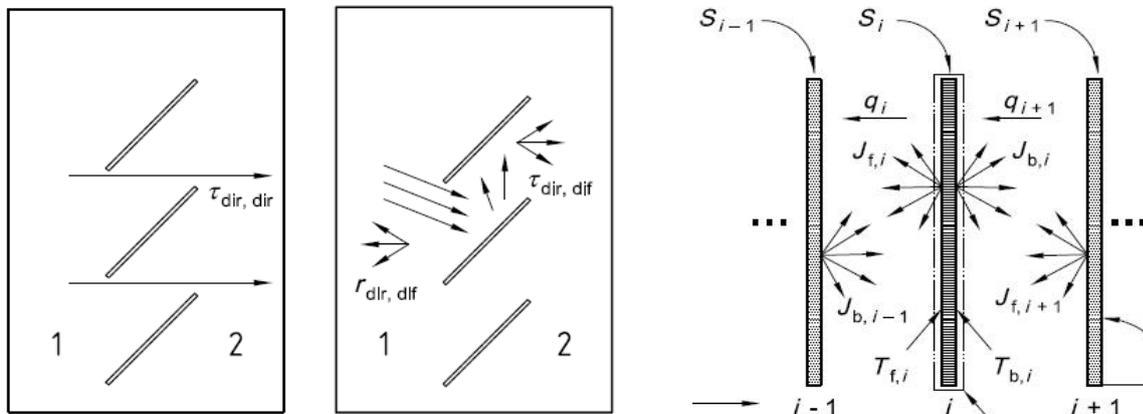


Abbildung 33: Thermische Modellierung von CFS nach ISO15099

Durch eine exemplarische Analyse einer diffus reflektierenden Lamelle in 45°-Winkelstellung und planer Geometrie konnte gezeigt werden, dass die effektive Emissivität sowie die Infrarottransparenz eines Lamellenlayers in direktem Zusammenhang mit den View-Faktoren innerhalb eines Lamellenzwischenraumes stehen (Abbildung 34).

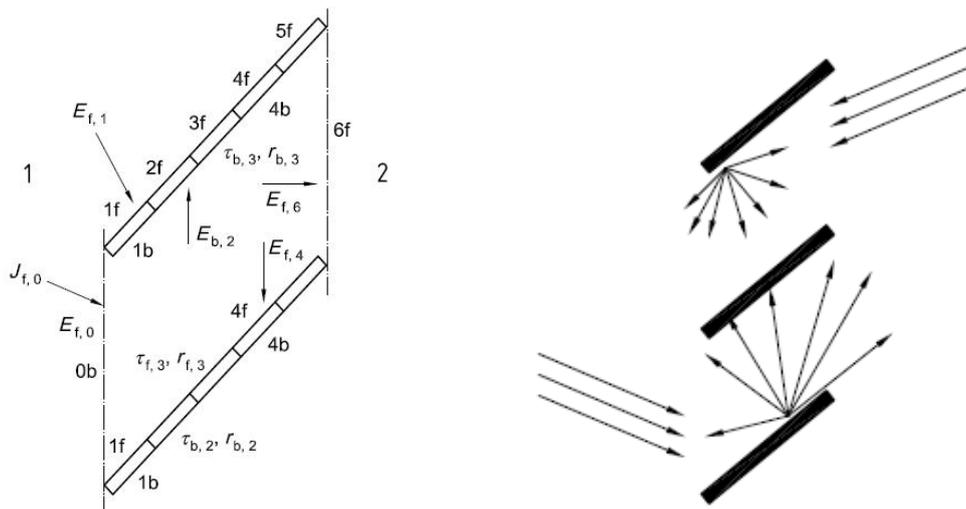


Abbildung 34: View-Faktorberechnung im diskretisierten Lamellenzwischenraum

$$\epsilon_{eff,f} = \epsilon_{slat,f} * F[3,2] + \epsilon_{slat,b} * F[3,4] = 0,9 * 0.08637 + 0,9 * 0.69216 = 0,7006 \quad (3)$$

$$\epsilon_{eff,b} = \epsilon_{slat,b} * F[1,4] + \epsilon_{slat,f} * F[1,2] = 0,9 * 0.69216 + 0,9 * 0.08637 = 0,7006 \quad (4)$$

**Tabelle 1: Ergebnisse der View-Faktorberechnung im Lamellenzwischenraum**

Flächen	Fläche 1	Fläche 2	Fläche 3	Fläche 4	Fläche 5	Fläche 6	Sum
	0.012	0.016	0.012	0.016	0.0001	0.0001	
Fläche 1		<b>0.0863</b>	<b>0.2166</b>	<b>0.6921</b>	0.0024	0.0024	1.0
Fläche 2	0.0647		0.5191	0.4112	0.0024	0.0024	1.0
Fläche 3	<b>0.2166</b>	<b>0.6921</b>		<b>0.0863</b>	0.0024	0.0024	1.0
Fläche 4	0.5191	0.4112	0.0647		0.0024	0.0024	1.0
Fläche 5	0.2137	0.2862	0.2137	0.2862		0.0000	1.0
Fläche 6	0.2137	0.2862	0.2137	0.2862	0.0000		1.0
Emissivität	0.84	0.9	0.84	0.9	0.999	0.999	

$$\tau_{IR,f} = \tau_{IR,b} = F(1,3) = F(3,1) = 0,216 \qquad \tau_{IR,ISO\ 15099} = 0,227 \quad (5)$$

Ein Vergleich der Ergebnisse für Infrarottransparenz und effektive Emissivität gegen Berechnungsergebnisse in WINDOW7 (5) für oben angeführte Lamelle zeigte eine sehr gute Übereinstimmung. Zusätzlich wurden die Werte für die effektive Lamellenemissivität auf Basis der berechneten View-Faktoren aus Tabelle 1 ermittelt (3 und 4) und ebenso mit WINDOW7 verglichen. Durch Implementierung dieser Faktoren in den Modellierungsalgorithmus des BSDF/ISO-Modells konnten anfängliche Ergebnisabweichungen des neuen TRNSYS-Modells im statische Vergleich mit WINDOW7 vollständig korrigiert werden. Das Modell war somit valide.

### 2.3.4 Definition des konvektiven Verhaltens von CFS Layer

Zusätzlich kommt es an den Luftschichten im Lamellenzwischenraum sowie in den Luftschichten vor und hinter der Lamelle zu konvektiven Austauschvorgängen. Deren Ausbildung ist im Wesentlichen abhängig von:

- Höhe der Verglasung und Breite des Luftspaltes
- Form und Anstellung der Lamelle
- Auftretende Temperatur und deren Schichtung über die Fassadenhöhe

Um eine rechen- und zeitintensive Strömungssimulation zu vermeiden, basiert das Konvektionsmodell der ISO15099 auf einer Druckverlustbilanz mit Berücksichtigung statischer und dynamischer Druckdifferenzen. Über den sogenannten „Effective Openess Factor“, definiert als prozentuellen Lochanteil an der Gesamtfläche der Verschattungslamelle, wird dabei der Einfluss einer veränderten Lamellenanstellung auf die Konvektion vereinfacht abgebildet (Abbildung 35).

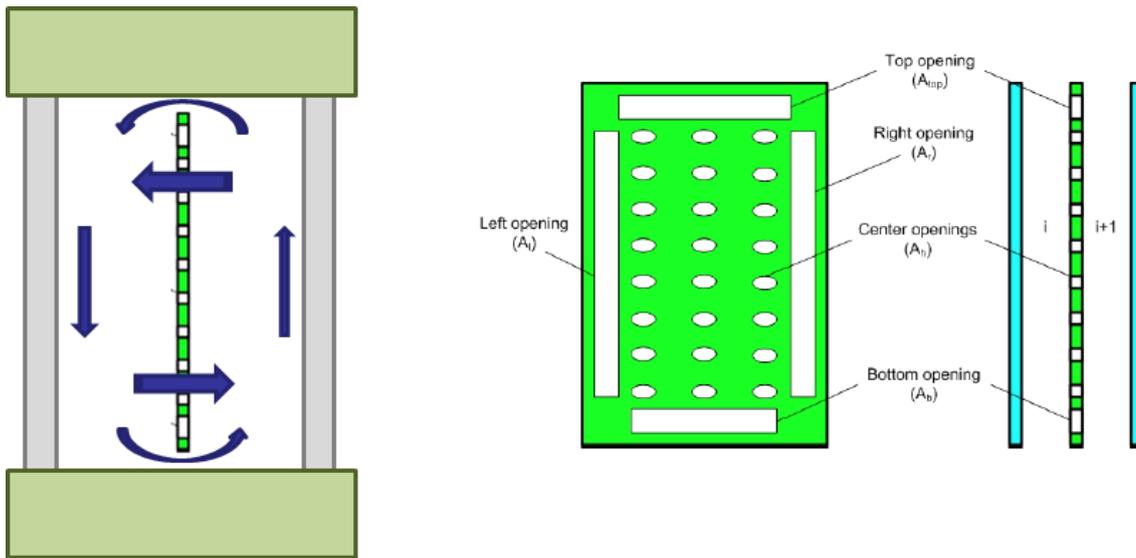
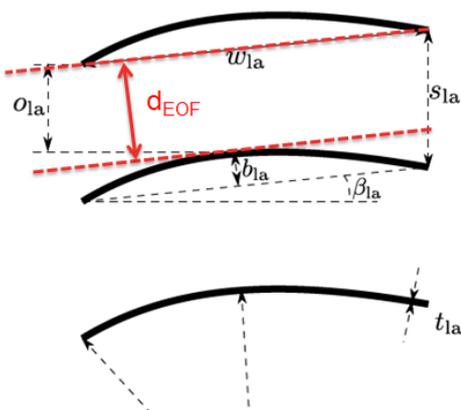


Abbildung 35: Messaufbau mit Lochblechprüfling (li.) und Schema des Lochblechs nach ISO 15099 (re.)

Vereinfacht kann dieser linear zur Lamellenstellung (0°-90°) zwischen 0 und 1 variiert werden. Dennoch ist der „Openess“-Faktor sehr unpräzise definiert in der ISO 15099 und kann unterschiedlich interpretiert werden. So ist der „effektiv“ sichtbare Lochanteil bei gleichbleibender Lamellenstellung (z.B. 45°) abhängig vom Blickwinkel auf die Fassade sehr unterschiedlich zu bewerten. Geht man für die Definition des Openess-Faktors von einer Blickrichtung normal auf die Fassade aus, würde dies im Falle der Versuchslamelle bei einem Anstellwinkel von 45° bereits einem Openess Factor 0.19 bedeuten, ab 60° Anstellwinkel wäre der Openess-Faktor 0, was aus Sicht des konvektiven Verhaltens nicht realistisch ist.

Es wurde deshalb eine neue geometrische Definition des EOF gewählt, welche als Verhältniszahl zwischen vertikalen Lamellenabstand  $s_{la}$  und dem der veränderlichen projizierten Lamellendistanz  $d_{EOF}$  definiert ist. Diese Definition basiert auf der Überlegung, dass die Lamellendistanz als besseres Kriterium für die Bewertung des Openess-Faktors fungiert. Die zusätzliche Einführung einer dynamischen Lamellendistanz  $s_{la}$  verstärkt die Annahme, dass der konvektive Austausch erst bei beinahe geschlossener Lamelle abgeschwächt wird.



$$d_{EOF} = \max(0, (s_{la} * \cos \beta_{la}) - b_{la})$$

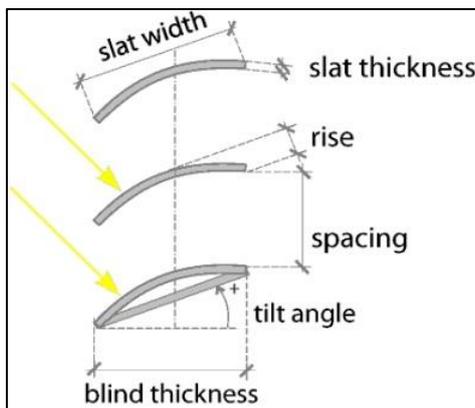
$$EOF_{stat} = \max(0, \left(\frac{d_{EOF}}{s_{la}}\right))$$

$$EOF_{dyn} = \max(0, \left(\frac{d_{EOF}}{s_{la} * \cos \beta_{la}}\right))$$

Abbildung 36: Geometrische Darstellung des EOF

Im nachfolgenden Diagramm ist der Verlauf beider Definitionen über den Anstellwinkel dargestellt. Für die verwendete Versuchslamelle mit konvex gekrümmter Form und den geometrischen Abmessungen nach ergeben sich durch die Neudefinition des Openess-Faktors nun deutlich höhere Werte im Vergleich zur Annahme nach ISO 15099 wie oben beschrieben. Im Falle einer 60° Lamelle besitzt der  $EOF_{stat}$  noch einen Wert von ca. 0.41, und der  $EOF_{dyn}$  sogar noch einen Wert von 0.82. Im Simulationsvergleich mit Messdaten wurde die Auswirkung der Faktoren messtechnisch verifiziert.

Tabelle 2: Abmessung der Versuchslamelle



Bezeichnung	Variable	Wert
Slat width	$\omega_{la}$	59 mm
Slat spacing	$s_{la}$	52 mm
Slat rise	$b_{la}$	4,6 mm
Slat angle	$\beta_{la}$	45°

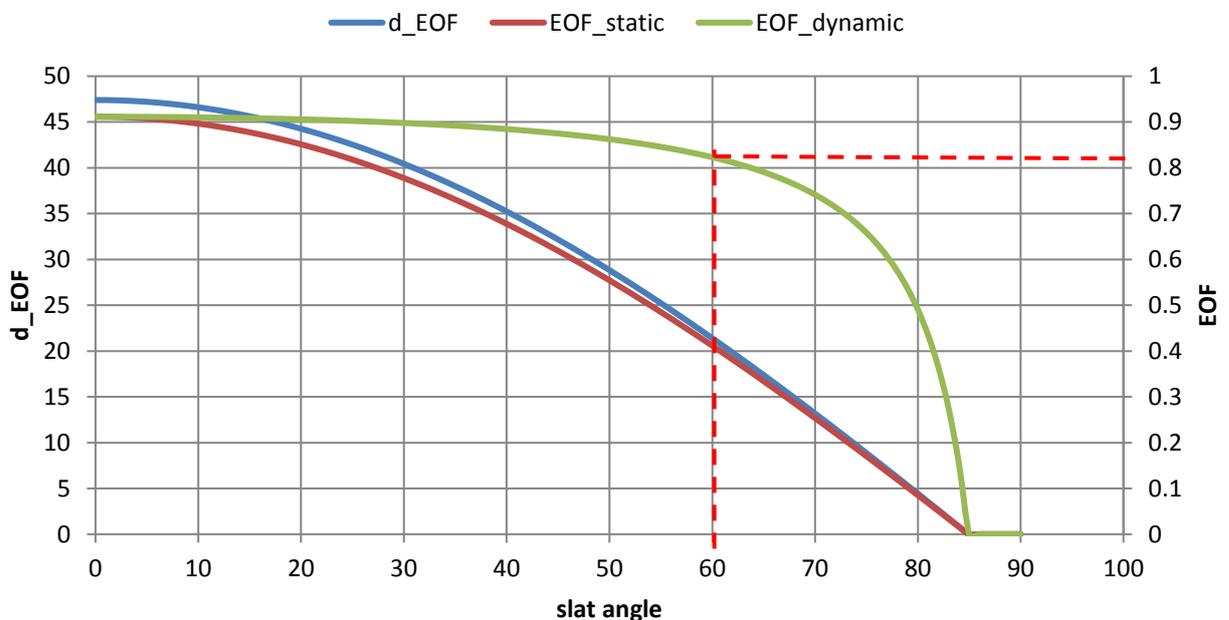


Abbildung 37: Redefinition des Effective Openess Factors auf Basis des Lamellenabstandes

## 2.4 ARTLIGHT - Kopplung von lichttechnischer und thermischer Simulation

### 2.4.1 Simulationsroutinen ARTLIGHT 1.0 und ARTLIGHT 2.0

Nach den durchgeführten Detailanalysen und Modelloptimierungen für die Teilbereiche der lichttechnischen Simulation (Kapitel 3.2) und der thermischen Simulation (Kapitel 3.3), wurden beide Komponenten in der gekoppelten Simulationsroutine ARTLIGHT vereint. Diese Routine bildete einen der Entwicklungsschwerpunkte in lightSIMheat und ermöglicht erstmals eine zeitschrittgekoppelte thermische und lichttechnische Modellierung im der dynamischen Gebäudesimulationssoftware TRNSYS (Transsolar Energietechnik GmbH).

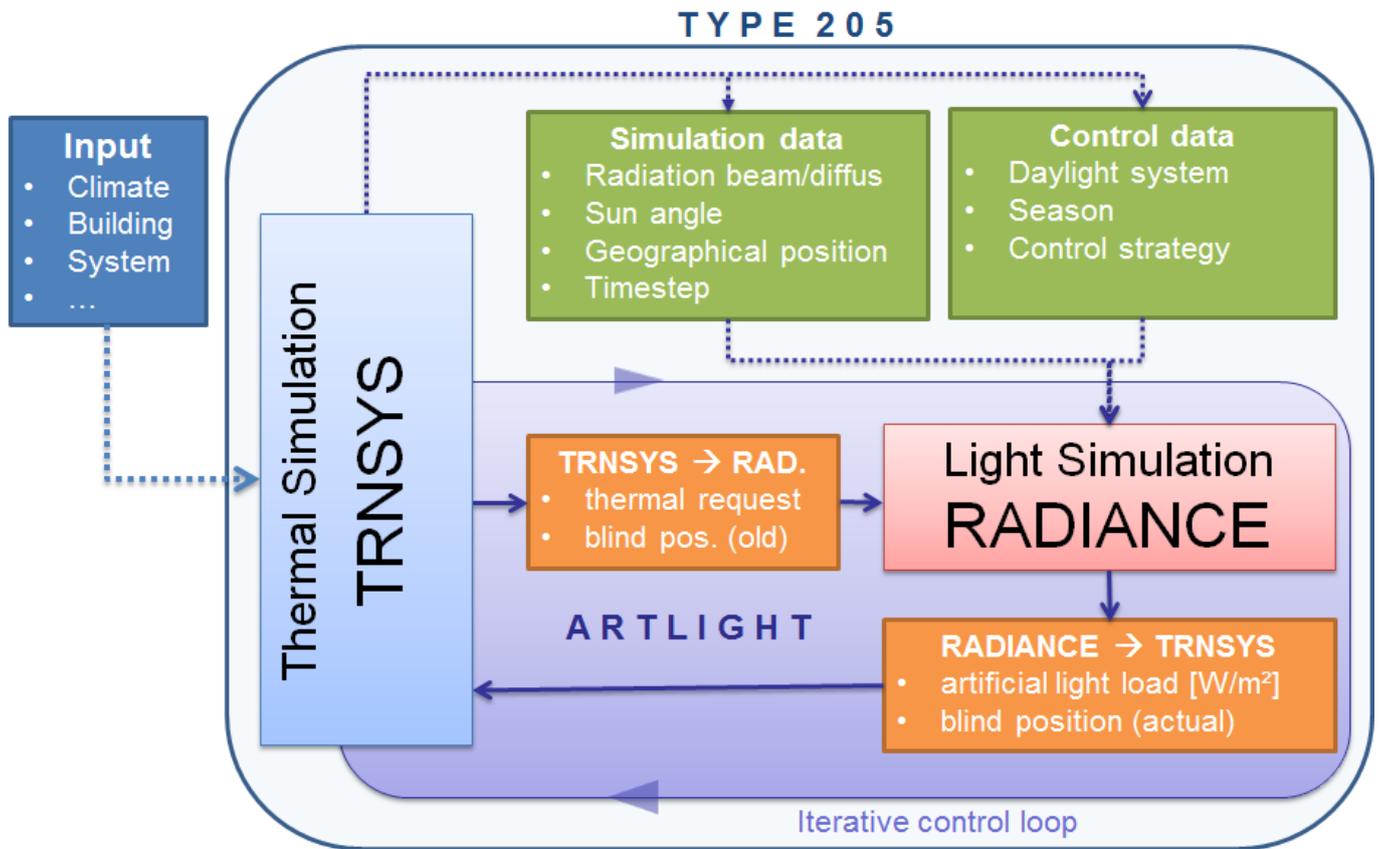


Abbildung 38: Zeitschrittbasierte Kopplungsroutine Artlight 1.0 aus „LichtausFassade“

Ausgangspunkt dafür bildete die erste Umsetzung einer zeitschrittbasierten Kopplungsroutine aus dem Vorgängerprojekt „LichtausFassade“ (FFG Projekt-Nr. 822281), dargestellt in Abbildung 38. In lightSIMheat wurde dieses Grundkonzept auf deren Funktionalität und Machbarkeit nochmals im Detail geprüft und durch ein optimiertes Konzept zur Datenzwischenspeicherung verbessert. Die Routine wurde als neues eigenständiges Modell in TRNSYS implementiert (Type 265) und ermöglicht nun eine zeitschrittgekoppelte thermische und lichttechnische Simulation auf Basis der 3-Phasen-Methode bei sehr effizienter Rechenlaufzeit. Die Basisversion (nur für eine Orientierung) wurde noch erweitert zur Abbildung von steuerbaren Fassadensystemen in mehreren Orientierungen. Durch die direkte Implementierung der notwendigen RADIANCE-Routinen für die Vorberechnung der 3-Phasen-Matrizen (Skymatrix SMX,

Daylightmatrix DMX, Viewfaktormatrix VMX), kann auf Basis der Geometrie des thermischen Modells von nun an eine Berechnung flexibler Raumgeometrien erfolgen. Eine Multi-Zonen Simulation bzw. Mehrgeschosssimulation ist durch Etablierung einer durchgängigen Datenhierarchie ermöglicht worden. Die neue Simulationsroutine wurde gegen die Vorgängerversion sowie andere Modelle simulationstechnisch erfolgreich validiert. Im Zuge einer durchgeführten Simulationsfallstudie (siehe Kapitel 4) wurde deren Potentiale, Funktionalität und Anwendbarkeit ausführlich geprüft.

In ARTLIGHT 1.0 (gekoppelte Simulationsroutine aus LichtAusFassade), basierend auf der RADIANCE 3-Phasen-Methode, wird die Multiplikation der vorberechneten Matrizen (S, DMS, BSDF, VMX) mit der standardmäßig verfügbaren RADIANCE-Routine „dc-timestep“ in jedem Simulationszeitschritt durchgeführt. Als Resultat ergibt sich ein Spaltenvektor mit den jeweiligen Beleuchtungsstärken aus den jeweiligen BSDF-Patches, bezogen auf den/die definierten Punkt(e) im Raum durch die VMX. Der Skyvektor (S) aus dem anisotropen Himmelsmodell generiert und auf Basis der verwendeten Klimadaten in der Jahressimulation (Perez,1999) im Zeitschritt berechnet. Die 3-Phasen Matrizen (DMX, BSDF und VMX) liegen bereits als vorberechnete Matrizen vor, was es grundsätzlich erst ermöglicht, eine stundenbasierte Tageslichtberechnung in der Jahressimulation mit vertretbarem Rechenaufwand zu ermöglichen.

Dennoch benötigt ARTLIGHT 1.0 für eine Jahressimulation einer Einzelfassade mehrere Stunden an Rechenzeit, was für mehrere Zonen / Gesamtgeschoße nicht zielführend ist. Die Ermittlung der Laufzeiten der Radiance-Routinen (*gendaylit*, *genskyvec*, *dctimestep*) während einer Standardsimulation zeigte, dass aufgrund der Ladens und Ausmultiplizieren der umfangreichen Matrizen (*dctimestep*) pro Zeitschritt und Iteration ca. 1,8 Sekunden verstreichen. Mit Iterationen kann daher ein Zeitschritt in Summe bis zu ca. 10 Sekunden benötigen.

Für nähere Ausführung zu ARTLIGHT 1.0 wird auf den Projektabschlussbericht von „LichtausFassade“ bzw. auf folgende Publikationen verwiesen:

- Hauer M, Neyer D., Geisler-Moroder D., Knoflach Ch., Streicher W., Pohl W., (2011), Combined thermal and light simulation method for daylight utilization, ISES SWC

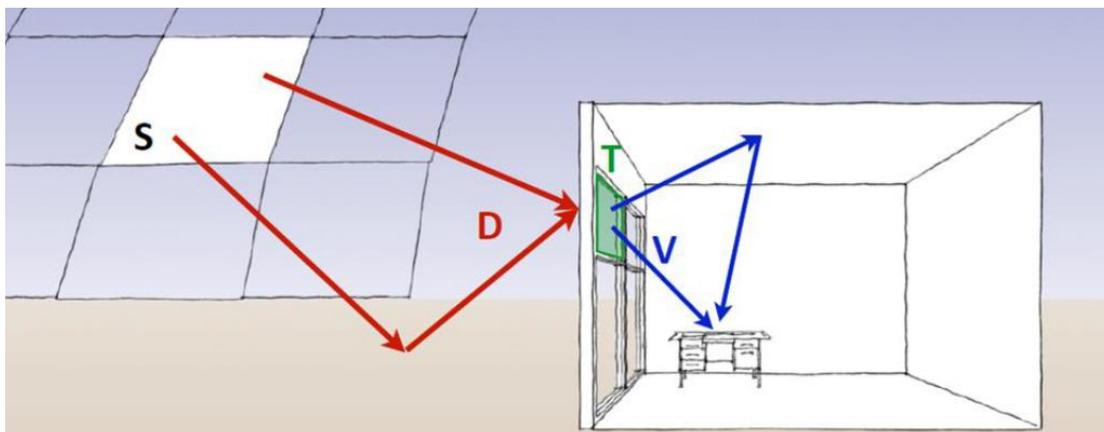


Abbildung 39: Visualisierung der 3-Phasen-Methode (Quelle: [www.radiance-online.org](http://www.radiance-online.org))

## Folgende Vorberechnungsschritte wurden für die optimierte Kopplung definiert:

- 1.) Vorberechnen des Skyvektors (S) zu einer Skymatrix (SM) für das gesamte Jahr:  
SMX [8760 x 2305]
  
- 2.) Bereitstellen aller notwendigen Matrizen-Varianten für einen Simulationslauf:  
DMX [2304 x 145] o-mal für „o“- Fassadenorientierungen im Simulationsmodell  
BSDF [145 x 145] m-mal für „m“ Systeme bzw. Stellungen  
VMX [145 x n] n-mal für „n“ auszuwertende Raumpunkte

Ursprünglich wurde als optimiertes Konzept eine vollständige Auslagerung der Matrizenmultiplikation innerhalb der Zeitschritt vorgestellt. Die würde prinzipiell dem Ziel einer Laufzeitoptimierung nachkommen und gleichzeitig die Flexibilität einer im Zeitschritt gekoppelten Methode wie bisher behalten (z.B. hinsichtlich Implementierung von Steuerstrategien). Allerdings wäre dies nur durch langwierige und aufwendige Vorberechnungsmaßnahmen aller theoretisch auftretenden Varianten vor jeder neuen Simulationssituation möglich gewesen. Dieser Aspekt würde dem Ziel von ARTLIGHT, als möglichst flexibles „Forschungs- und Analysetool“ nicht optimal nachkommen.

Aus diesem Grund wurde dieses Konzept nochmals überarbeitet und man ist darauf zurückgegangen, die eigentliche Multiplikation der Matrizen im Simulationszeitschritt zu belassen – es werden somit nur jene Kombinationen der Matrixmultiplikation durchgerechnet, die auch wirklich auftreten. Motivationsgrund hierzu ist zudem, dass sich die Multiplikation nicht der kritische Zeitfaktor herausstellte und diese sehr effizient in der Programmiersprache FORTRAN umzusetzen war. Das Laden der Matrizendaten in jedem Zeitschritt konnte umgangen werden, indem sogenannte „Module“ in die Subroutine des Modellcodes eingebunden wurden. Dies erlaubt eine Zwischenspeicherung von Daten im Arbeitsspeicher auch zwischen mehreren Aufrufen der Subroutine (also für mehrere Simulationszeitschritte). Das Laden der Daten kann somit einmalig auf den Anfang der Jahressimulation ausgelagert werden, danach verbleiben sie für den Rest der Simulation im Arbeitsspeicher.

### Modellstruktur:

In Abbildung 40 ist die Organisationstruktur des neu strukturierten Modells ARTLIGHT 2.0 visualisiert und beschreibt bereits den Datenfluss im Falle einer lichttechnisch-thermisch gekoppelten Simulation. Die grau eingefärbten Kästchen beschreiben die integrierten Module im Type 265. Das grüne Kästchen repräsentiert das Multizonen-Gebäudemodell (Type 56), welches in bilateralem Austausch mit Type 265 steht. Das Type 15 fungiert als Strahlungsprozessor und liefert die notwendigen Klimarandbedingungen für das Gebäudemodell und das ARTLIGHT-Modul.

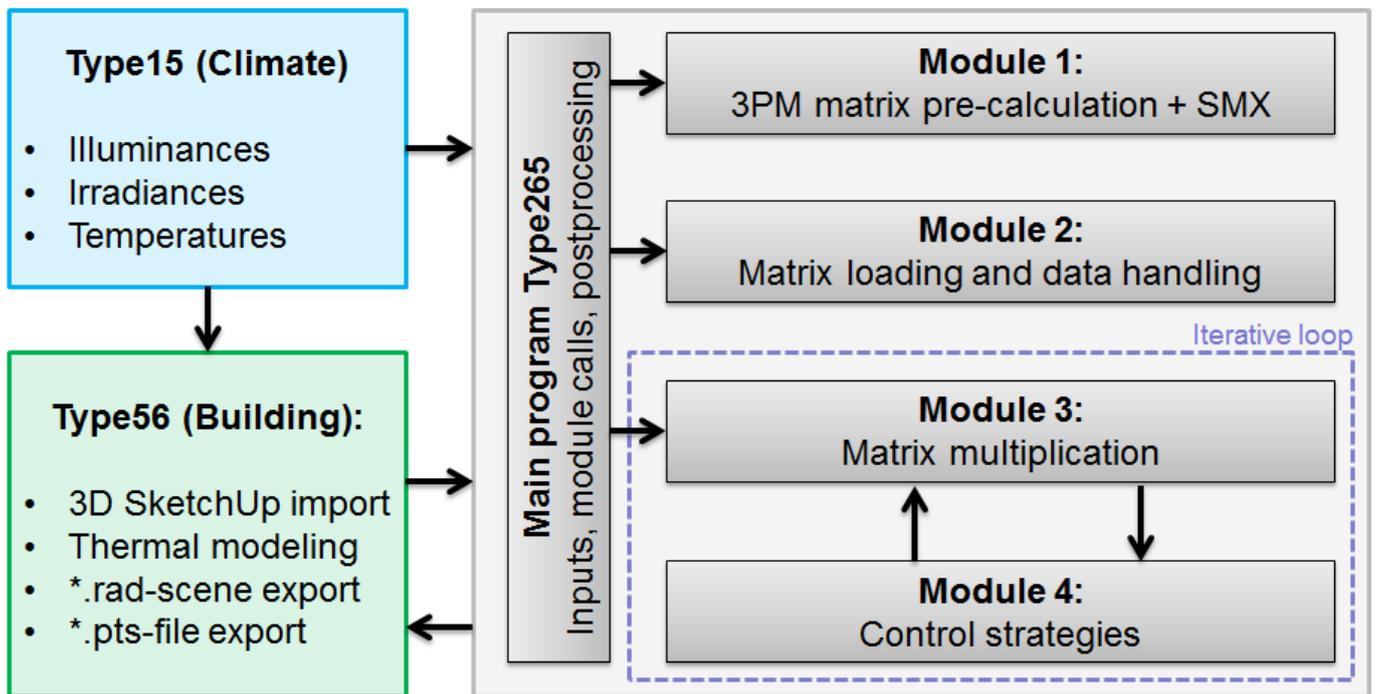


Abbildung 40: Organisationstruktur von Artlight 2.0

Der Type 256 besteht aus einer Hauptroutine, in der das gesamte Daten-Handling basierend auf dem TRNSYS-Codekonvention umgesetzt ist (Variablendefinition und –Deklaration, Umrechnungen, Post-processing und Outputs setzen). In den eingegliederten Modulen (Modul 1-4) sind die Hauptaufgaben während einer Artlight-Simulation programmiert. Die Module ermöglichen zum einen eine effiziente Zwischenspeicherung der Matrixdaten und zum anderen eine verbesserte Übersicht im Code. Folgende Informationsflüsse gemäß Tabelle 3 werden standardmäßig zwischen den dargestellten Types in Datenflüsse definiert.

Tabelle 3: Datenfluss zwischen Type 265 und externen Modellen

Type 265 → Type 56	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kunstlichtbedarf in W/m<sup>2</sup></li> <li>• Tageslichtoptimierte Lamellenstellung für alle Behänge</li> </ul>
Type 56 → Type 265	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Thermal request</li> </ul>
Type 15 → Type 265	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkt-normal- / Diffusstrahlung (bei Inputmode gendaylit , -W')</li> <li>• Direkt-normal- / Diffusbeleuchtungsstärke (bei Inputmode gendaylit , -L')</li> <li>• Solarazimuth, Solarzenith</li> </ul>

**Tabelle 4: Liste an Parametern, Inputs und Outputs des Type 265 ARTLIGHT 2.0**

PARAMETER	INPUTS
Latitude	Direct-normal illuminance
Longitude	Diffuse illuminance horizontal
Meridian	Solar zenith angle
Orientations	Solar azimuth angle
Number of window subdivisions	Month / Day / Hour
Sky-mode (1=Skyvec, w=Skymtx)	thermal request
dl_control	Occupancy schedule
th_control	Weekend schedule
Number of BSDFs (window subdivision 1)	Parametric run
Number of BSDFs (window subdivision 2)	
blind position (default)	<b>OUTPUTS</b>
Min illuminance on work pane	Evaluated Illuminance (subdivision 1)
Min illuminance on space area	Evaluated Illuminance (subdivision 2)
Illuminance sensors on work pane	Evaluated luminance (subdivision 1)
Illuminance sensors on space area	Evaluated luminance (subdivision 2)
Max luminance (window subdivision 1)	Slat position (subdivision 1)
Max luminance (window subdivision 2)	Slat position (subdivision 1)
luminance sensors (window subdivision 1)	Artificial light demand
luminance sensors (window subdivision 2)	Mean work pane illuminance value
Fixed blind mode	Max Facade luminance value
Façade configuration (for parametric runs)	Number of iterations
	Endflag

Tabelle 4 zeigt ein Standardset an Outputs, je nach Anwendungsschwerpunkt und fortschreitendem Entwicklungsstand können diese allerdings variieren.

Im Falle der Verwendung der Skymatrix anstelle des stündlichen Skyvectors in der Jahressimulation fallen die Input von Type 15 an Type 265 weg. Für die Regelstrategie können zudem externe Schedules für „Occupancy“ und „Weekend“ eingekoppelt werden, dies ermöglicht eine zusätzliche Optimierung der Steuerstrategie. Die Regelstrategie ist vollständig in Modul 4 umgesetzt, weshalb keine zusätzlichen Steuerungsinputs extern definiert werden müssen. Die iterative Schleife zur Optimierung der Blendenstellung pro Behang wird in ARTLIGHT nun intern zwischen Modul 3 und 4 zeiteffizient ausgeführt. Neben den Standardoutputs aus Tabelle 4 werden noch die stündlichen Ergebnisse für alle Beleuchtungsstärkesensoren sowie alle Leuchtdichtesensoren als Ergebnisfiles im Simulationsordner abgelegt. Dieses können für ein einfaches Post-Processing (vorzugsweise in MATLAB) verwendet werden.

### 2.4.2 Neues Simulationsdatenmanagement in ARTLIGHT 2.0

Sowohl das thermische als auch das lichttechnische Geometriemodell basieren auf dem 3D-SketchUp-Modell. Wobei in der Simulation individuelle Dateien herangezogen werden:

- Thermische Modellierung: \*. b17-file als Inputdatei für Type56
- Lichttechnische Modellierung: generierte RADIANCE-Szene auf Basis exportierter \*. rad-files aus Type 56.

Alle zur Simulation notwendigen Daten werden im zugehörigen Ordner zur TRNSYS-Simulation in einem Unterordner abgelegt. Pro simulierter thermischer Zone im Modell wird auch ein eigener Unterordner für die ARTLIGHT-Inputdaten abgelegt sein (Zone1, Zone2, Zone\_n...), da die thermische Rückkoppelung (thermal request) pro thermischer Zone erfolgt. Prinzipiell kann aber der Nutzer selbst entscheiden, ob für jede thermische Zone eine eigene lichttechnische Szene aufgebaut wird. Für nicht beschattete, mehrgeschossige Multi-Zonengebäude mit weitgehend identer Raumgeometrie ist eine Zusammenfassung aller Räume/Orientierung sinnvoll. Das würde dann 3 Kunstlichtszenen bedeuten, welche auch raumtechnisch individuell gestaltet werden können.

ARTLIGHT greift selbstständig auf die abgelegten Daten im Unterordner der Simulation zu, weshalb es sehr wichtig ist die vorgegebene Datenstruktur einzuhalten. Im Ordner *matrix* sind alle vorberechneten Matrixdateien abgelegt, welche am Simulationsbeginn von ARTLIGHT in den Arbeitsspeicher geladen werden. Pro Fassadenbehang können bis zu 10 unterschiedliche BSDFs (also Lamellenstellungen, inkl. gerafftem Zustand) definiert werden. Wichtig ist, dass die BSDFs mit zunehmend geschlossener Stellung aufsteigend nummeriert werden. Im Ordner *misc* befinden sich temporär genierte Inputfiles für die RADIANCE-Routinen (\*.oct-files), im Ordner *scene* alle rad-files zur Beschreibung der Scene. Diese könnten aus dem Type 56 exportiert werden und später auch noch manuell adaptiert werden können. Im Ordner *grids* sind die Grid-Raster für die Beleuchtungsstärken und die Leuchtdichten in zwei separaten Files abgelegt. Es können beliebig viele Punkte definiert werden, wobei später in ARTLIGHT festgelegt werden kann, welche Sensorpunkte für die Steuerung des Lamellenbehangs relevant sind. Die restlichen Sensorpunkte sind werden dann zu Auswertezwecken (z.B. Auswertung Daylight-Metriken) mitgerechnet.

#### Modul 1: Matrizengenerierung nach der 3-Phasen-Methode

Dieses Modul greift auf die RADIANCE-Routinen zur Erstellung der 3-Phasen-Matrizen zu und legt die auf Basis der Szenenbeschreibung berechneten Matrizen (DMX, VMX, SMX) im zugehörigen Zonenordner ab. Die Berechnungen werden jeweils am Beginn der Simulation (vor dem 1. Zeitschritt) durchgeführt und müssen nur nach Änderungen der Szenengeometrie wiederholt werden.

#### Modul 2/3: Matrixmultiplikation und internes Datenmanagement:

In diesem Modul werden die notwendigen Simulationsdaten am Beginn jeder Simulation geladen. Der Ladevorgang erfolgt nun nur mehr einmal am Beginn, für die weiteren Simulationsschritte sind die Daten

im Arbeitsspeicher bis zum Ende der Simulation in der „matrix data storage“ abgespeichert. Der Zugriff auf die notwendigen Matrixdaten erfolgt im Zeitschritt abhängig von Jahresstunden (SMX), Fassadenorientierung (DMX, VMX) und Lamellenstellung (BSDF) über eine 3PM-multiplication loop (Abbildung 41). Die VMX liegt einmal für die Berechnung der Beleuchtungsstärken (VMX<sub>lx</sub>) und der Leuchtdichten an der Fassade (VMX<sub>vw</sub>) vor. Für die Simulation von Lichtlenksystemen können auch zwei voneinander unabhängige Fassadenbereiche pro Orientierung definiert werden – dadurch duplizieren sich die Elemente für DMX, BSDF und VMX für den zweiten Systembehang.

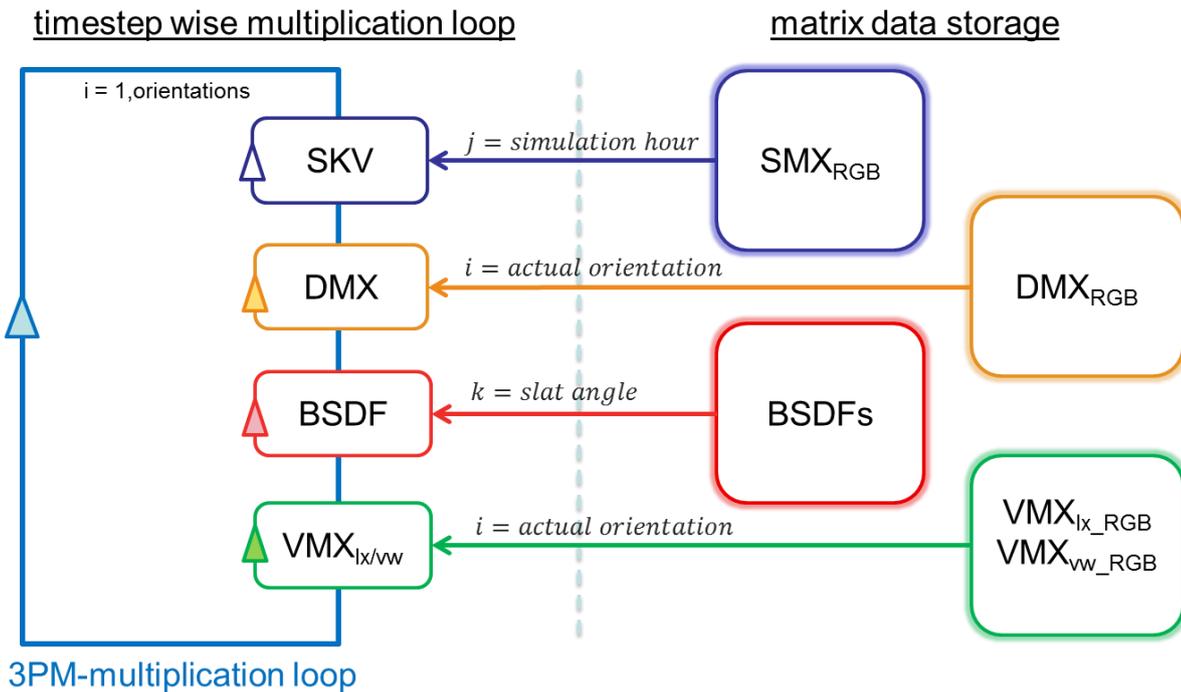


Abbildung 41: zeitschrittweise Multiplikationsschleife nach der 3-Phasen-Methode

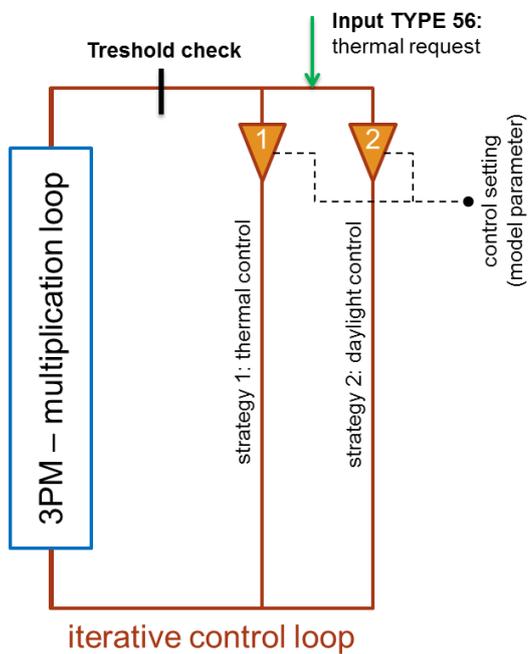
Die Ausmultiplizieren erfolgt nun nach (6) zeiteffizient pro Zeitschritt und Iteration im Type 265. Das Ergebnis pro Beleuchtungsstärkesensor (7) bzw. Leuchtdichtepunkt (8) ergibt sich aus der Gewichtung der RGB-Anteile.

$$Z = \begin{bmatrix} 1 \\ \dots \\ 2306 \end{bmatrix}^T * \begin{bmatrix} 1 & 145 \\ \dots & \dots \\ 2306 & \dots \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 145 \\ \dots & \dots \\ 145 & \dots \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & s \\ \dots & \dots \\ 145 & \dots \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$E_{s,sum} = Z_{lx_R} * 0.265 + Z_{lx_G} * 0.67 + Z_{lx_B} * 0.065 \quad (7)$$

$$L_{s, o} = Z_{vw_R} * 0.265 + Z_{vw_G} * 0.67 + Z_{vw_B} * 0.065 \quad (8)$$

**Modul 4: Steuerungsmodul:**



Der „Multiplication loop“ überlagert ist die „Iterative control loop“, welche es erlaubt die 3-Phasen-Multiplikation mehrmals durchzuführen, für den Fall das die optimale Lamellenstellung im ersten Durchlauf noch nicht erreicht wurde. Entschieden wird dies anhand der lichttechnischen Kriterien:

- Min. Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz
- Max. Leuchtdichte an der Fassade

Die Grenzwerte hierzu können als Modellparameter vorgegeben werden. Die Lamelle wird solange geöffnet, bis der Beleuchtungsstärkegrenzwert erreicht ist bzw. das Blendkriterium erfüllt ist.

**Abbildung 42: iterative Steuerungsschleife**

Wird die geforderte Beleuchtungsstärke nicht erreicht, wird ergänzend Kunstlicht zugeführt. Über Einbezug eines definierbaren Wertes für Raumwirkungsgrades und Kunstlichteffizienz (lm/W) wird der Kunstlichteintrag dem thermischen Raummodell als „gain“ zugeführt. Im Falle einer drohenden Überhitzung erlaubt der „thermal request“ ein thermisches Eingreifen in den Steuerungsprozess.

**2.4.3 Validierung und Laufzeitvergleich:**

Die Laufzeit der neu umgesetzten Kopplungsroutine ARTLIGHT 2.0 (Type 265) wurde mit der ursprünglichen Routine ARTLIGHT 1.0 (Type 205) sowie dem Type DLT (Entwickeltes Modell von EURAC Research) verglichen. Beide Methoden basieren dabei auf der konventionellen Methode der 3PM-Berechnung mit inkludierter „dc-timestep“-Methode zur Matrizenmultiplikation.

Abhängig von der Komplexität des Simulationsmodells ergeben sich unterschiedliche Laufzeiten in ARTLIGHT 2.0 (Abbildung 43). Mit der Umsetzung von Matrixmultiplikation und Datenzwischenspeicherung konnte bereits eine deutliche Verkürzung der Jahressimulation auf ca. 1,5h erreicht werden. Durch zusätzliche Vorberechnung aller Skyvektoren (zur Skymatrix SMX) reduzierte sich die Laufzeit nochmals fast um den Faktor 8 auf 12min pro Jahressimulation.

Ein Vergleich der Ergebnisse für unterschiedliche Beleuchtungsstärkesensoren in der Raumtiefe (1. Januar, 12.00 Uhr) zwischen ARTLIGHT 2.0 und TypeDLT zeigt eine perfekte Übereinstimmung (Abbildung 44).

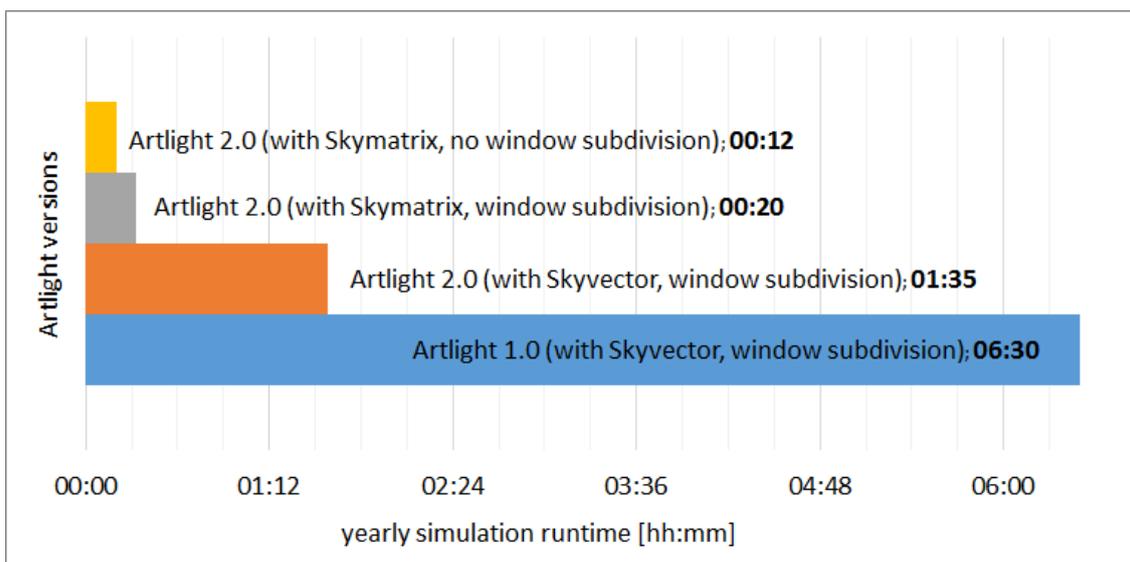


Abbildung 43: Laufzeiten der neuen Kopplungsroutine

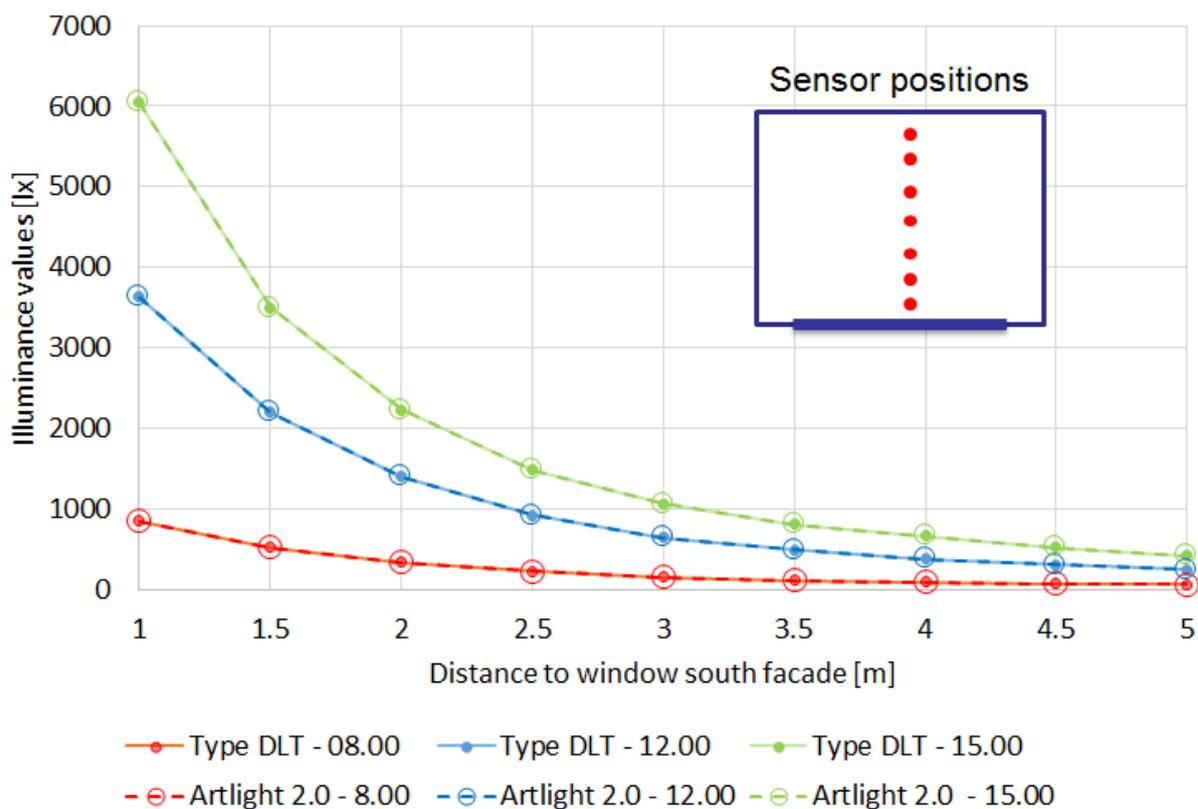


Abbildung 44: Validierung 1: ARTLIGHT 2.0 gegen TypeDLT

In Abbildung 45 ist ein Vergleich der Beleuchtungsstärkeergebnisse für einen dynamischen Tagesverlauf dargestellt. Auch hier ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Methoden, wodurch der neu implementierte Code zur Matrizenmultiplikation valide ist.

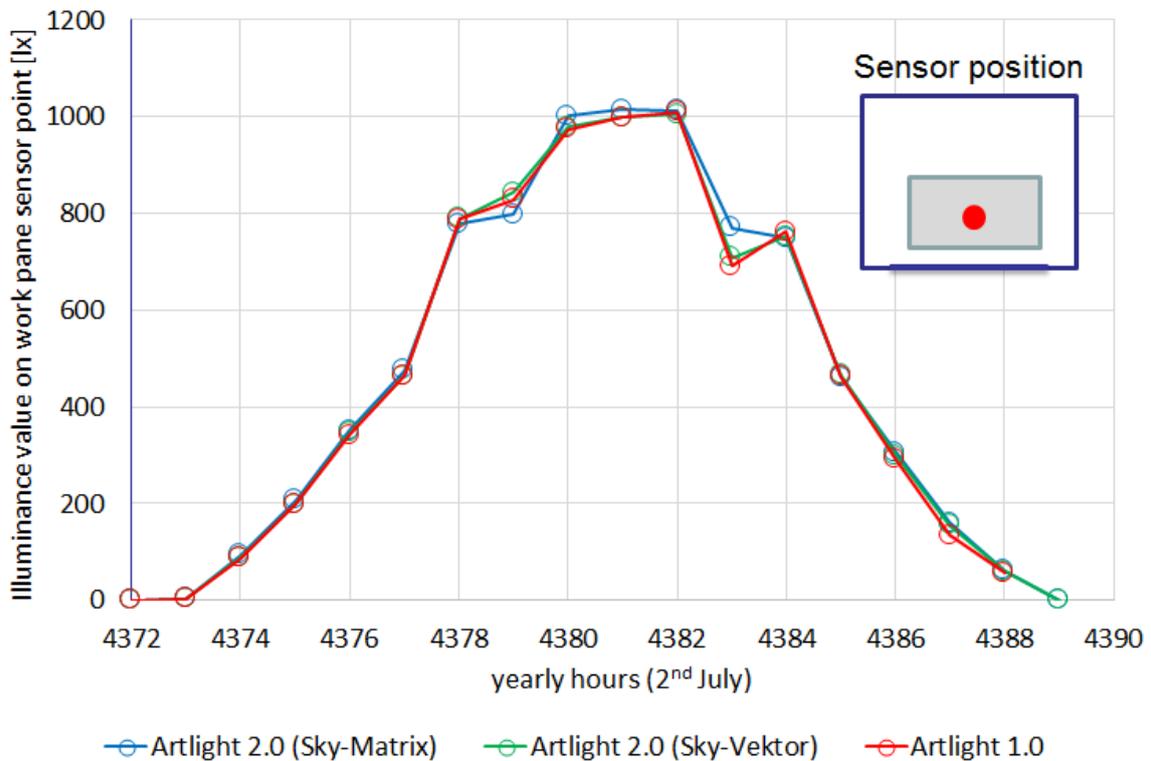


Abbildung 45: Validierung 2: ARTLIGHT 2.0 gegen ARTLIGHT 1.0 im Tagesverlauf

#### 2.4.4 Kopplungsmodelle unterschiedlichen Detaillierungsgrades

Basierend auf dem Konzept der neu umgesetzten Kopplungsroutine ARTLIGHT 2.0 (siehe vorheriges Kapitel) wurden zusätzlich unterschiedliche Optimierungsvarianten ausgearbeitet. Dies ermöglichen das Simulationsmodell besser an unterschiedliche Detaillierungsgrade anzupassen.

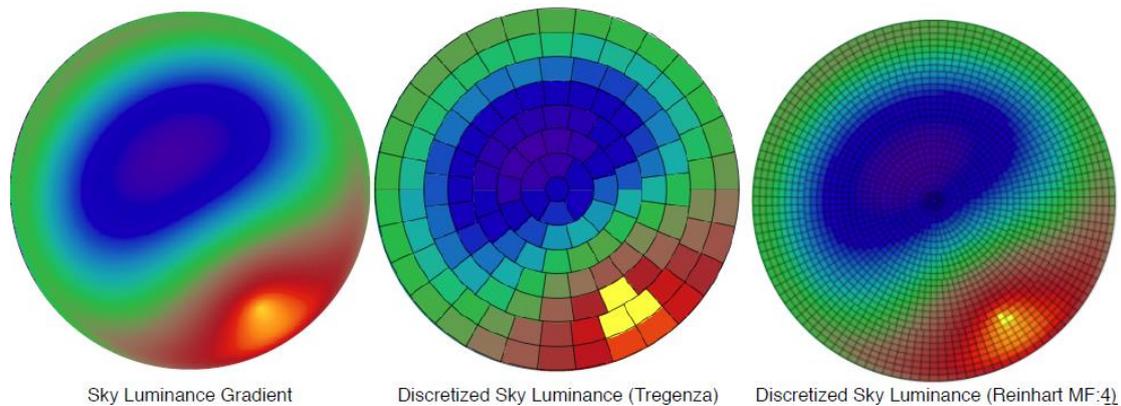
##### Skyvector vs. Skymatrix

Die gekoppelte Simulation in ARTLIGHT 2.0 kann sowohl mit der im Zeitschritt erfolgten Berechnung des *Sky-Vektors* als auch mit der vorab für das gesamte Jahr berechneten *Skymatrix* erfolgen. Erstere Variante bietet Vorteile vor allem in der Betrachtung von sehr kurzen Zeitabschnitten im Jahr (Stunden-/Tagesbetrachtung), da hierfür nicht das gesamte Jahr vorberechnet werden muss, sondern nur die Himmelszustände der tatsächlich simulierten Stunden berechnet werden. Zweite Variante bietet klare Vorteile in der Jahressimulation bzw. in der Variantenrechnung. Hier zeigt sich gemäß dem Laufzeitvergleich aus Abbildung 43 eine deutliche Zeitersparnis trotz Vorberechnung der gesamte Skymatrix für das volle Jahr. Beide Modi können sehr einfach über einen Modellparameter ausgewählt werden.

##### Unterschiedliche Auflösung der Himmelsmodelle

Für die Abbildung der Himmelsleuchtdichten werden in RADIANCE basierend auf der standardisierten Himmelsbeschreibung nach CIE unterschiedliche Diskretisierungsstufen unterschieden. Während in Abbildung 46 (links) ein kontinuierlicher Himmel nach CIE dargestellt ist, zeigt Abbildung 46 (Mitte) die

davon abgeleitete Diskretisierung nach Tregenza (146 Skypatches) und Abbildung 46 (rechts) die höher aufgelöste Diskretisierung nach Reinhart (2306 Skypatches). Wobei jeweils ein Patch die Bodenreflexion beschreibt, die restlichen Patches sind im Himmelshalbraum verteilt.



**Abbildung 46: Himmelsdiskretisierung basierend auf der Himmelsbeschreibung nach CIE (McNeil 2014)**

Eine geringere Anzahl an Skypatches reduziert Datenmenge und Rechenzeit in der Erzeugung, insbesondere im Falle der Daylight-Matrix, da deren Dimension in der 3-Phasen-Berechnung direkt an die Auflösung des Himmelsmodells gekoppelt ist. Eine geringere Auflösung kann also hier u.U. Sinn machen, weshalb diese Möglichkeit auch besteht.

Ein deutlicher Nachteil besteht allerdings in der ungenauen Abbildung des Sonnenpunktes – wie in Abbildung 46 (Mitte) klar ersichtlich, verschmiert eine grobe Diskretisierung den Sonnenfleck über eine sehr große Fläche am Himmel. Dies kann zu unrealistischem Sonnendurchschlag bei Lamellensystemen, und somit zu deutlichen Berechnungsfehlern führen. Speziell bei komplexen, tageslichtlenkenden Systemen sollte daher die höhere Auflösung nach Reinhart gewählt werden. In ARTLIGHT 2.0 ist diese Auflösung als Standard definiert.

**Einzel-/ Mehrfachfassadenbehänge simulieren**

Um die Simulation komplexer Tageslichtlenksysteme mit zweiteiligem Fassadenbehang zu ermöglichen, wurde diese Funktionalität integriert. In Abbildung 47 ist links ein geteilter Fassadenbehang mit oben liegendem Lichtlenkteil und rechts eine geteilte Fassade mit mittig liegendem Lichtlenkteil dargestellt. Dabei ist es aktuell zwar nicht möglich, mehr als 2 unterschiedlich ansteuerbare Systeme zu berücksichtigen, allerdings können beide Fassadenbehänge mehrmals innerhalb der Fassade unterteilt werden. So kann es sein, dass sich durch einen mittleren Lichtlenkbereich effektiv 3 Fassadenbereiche ergeben, wobei der obere und untere Behang dasselbe Lamellensystem mit gleicher Ansteuerung haben. Die implementierte Steuerstrategie behandelt beide Behänge separat und versucht, dass über den Lichtlenkteil effizient Tageslicht genutzt wird, während der abschattende Fassadenteil zu hohe Solareinträge blockt.

In der Jahressimulation erhöht sich die Rechenzeit eines Doppelbehanges im Vergleich zu einer Einzelfassade für einen Einzelreferenzraum nach Abbildung 47 von ca. 12 Minuten auf 20 Minuten.

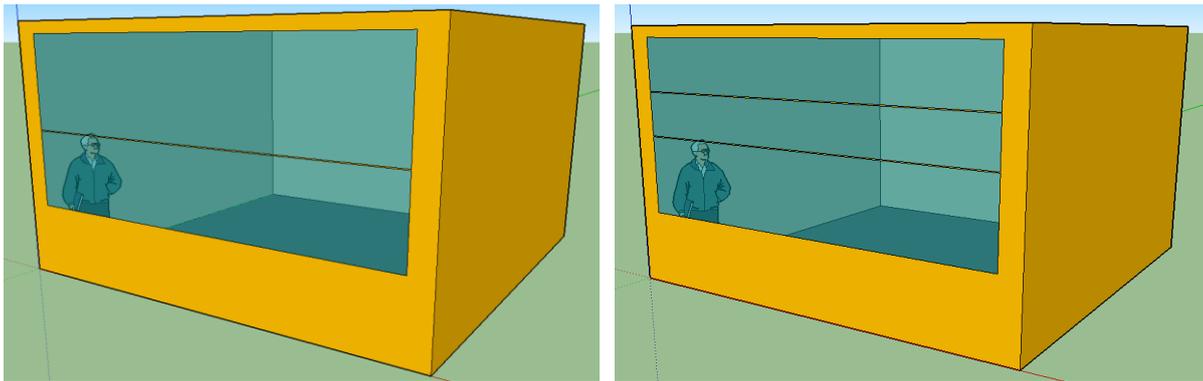


Abbildung 47: Mehrfachfassadenbehang: 2-teilig (links), 3-teilig (rechts)

### Einzelorientierung vs. Mehrfachorientierung von Fassaden

Für einfache Konzeptstudien unterschiedlicher Fassadenbehänge genügt es oft, einen Einzelraum mit einseitig orientierter Fassade zu betrachten. Bei der Modellierung realer Szenarien oder bei der Untersuchung von Eckräumen reicht es nicht mehr aus, nur eine einseitig orientierte Fassade zu betrachten. Es wurde deshalb im Algorithmus von ARTLIGHT 2.0 die Möglichkeit berücksichtigt, optional mehrere Orientierungen in der Auswertung zuschalten zu können. Je nach Anzahl der Orientierungen (max. jedoch 3, die Nordfassade besitzt keine Beschattung) wird dann die 3-Phasen-Berechnung nach Abbildung 41 dann entsprechend oft durchgeführt. Nach Durchlauf der Berechnung aller 3 Orientierungen werden die Beleuchtungsstärken pro Orientierung zur Gesamtbeleuchtungsstärke im Raum addiert. Die Blendungsbewertung hingegen erfolgt für jeden Fassadenbehang individuell. Um das Problem der sich gegenseitig beeinflussenden Fassadenansteuerung zu lösen, wurde folgendes vereinfachte Konzept nach Abbildung 48 ausgearbeitet. Es zeigt, dass immer nur jene Fassadenorientierung nach den Kriterien in Abbildung 42 aktiv gesteuert wird, welche aktuell der Sonne zugewandt ist. Die restlichen Fassaden bleiben konstant in offener Stellung um Tageslicht zu nutzen, da hier Blendung durch direkte Sonnen ausgeschlossen werden kann.

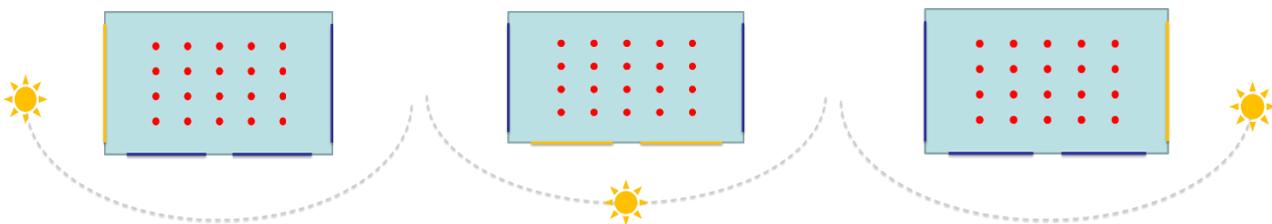
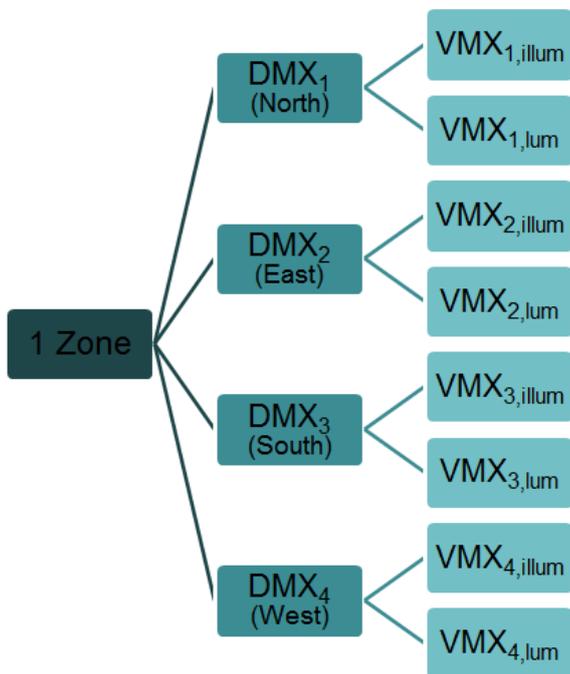


Abbildung 48: Sonnenstandsabhängige Ansteuerung der Fassade

Da die Simulation von mehreren Orientierungen pro Raum rechenaufwendig ist, wurde auch diese Funktion als optional auswählbar in die Modellparameter implementiert. Aktuell ist die Modellstruktur für Mehrorientierungen im Modell umgesetzt, das Konzept der sonnenstandsabhängigen Ansteuerung ist noch zu implementieren.

### 2.4.5 Verallgemeinerung des Kopplungsansatzes und Multizonen – Anwendung



Die Umsetzung und Erprobung des umgesetzten Kopplungsalgorithmus erfolgte immer an Hand eines exemplarischen Einzelraummodells. Beim Aufbau der Modell- und Datenstruktur wurde allerdings von Beginn an berücksichtigt, später eine Skalierbarkeit vom Ein-Zonenmodell auf ein Mehr-Zonenmodell zu ermöglichen. In Abbildung 49 ist der Aufbau eines Strukturbaumes pro thermischer Zone dargestellt. So erlaubt das Modell eine Berücksichtigung von bis zu 4 verschiedenen Orientierungen (4 DMX) mit jeweils max. 2 unterschiedlichen Fassadenbehängen, wobei in dieser Abbildung beide Behänge in einer DMX/VMX zusammengefasst sind. Unabhängig von der thermischen Zonierung kann dabei die „lichttechnische Zonierung“ ident gewählt werden (empfohlen) oder unabhängig davon.

Abbildung 49: Daten-Matrixstruktur in ARTLIGHT 2.0

So bietet es sich im Falle eines mehrgeschossigen Bürogebäudes mit quadratischer Grundfläche an, dieses pro Geschoß thermisch in 4 Perimeterzonen und 1 Kernzone zu unterteilen. Der Energieaustausch zwischen den Geschoßen kann vernachlässigt werden, wodurch es in der Simulation genügt nur 1 Stockwerk mit adiabater Decken- und Grundfläche zu betrachten. Für eine vereinfachte lichttechnische Berechnung wird dann 1 Einzelraumbüro pro sonnenzugewandter Fassade (Ost-/Süd-/Westfassade) herausgegriffen und repräsentativ für alle Räume in der Fassade simuliert. Nach diesen Ergebnissen kann die gesamte Fassade in dieser Orientierung gesteuert werden, da auch thermisch der gesamte Fassadenbereich zu einer gemeinsamen Zone zusammengefasst ist. Im Falle komplexerer Gebäude kann dieses Vereinfachungskonzept natürlich reduziert werden, wobei dadurch Modellierungsaufwand und Rechenzeiten stark zunehmen.

Die umgesetzte Modellalgorithmus ARTLIGHT 2.0 wurde in lightSIMheat in die Softwareumgebung TRNSYS implementiert und getestet.

Die Kernstücke aus ARTLIGHT:

- 3-Phasen-Multiplikation in FORTRAN
- implementierte Steuerlogik
- Systematik zu Datenmanagement und Zwischenspeicherung

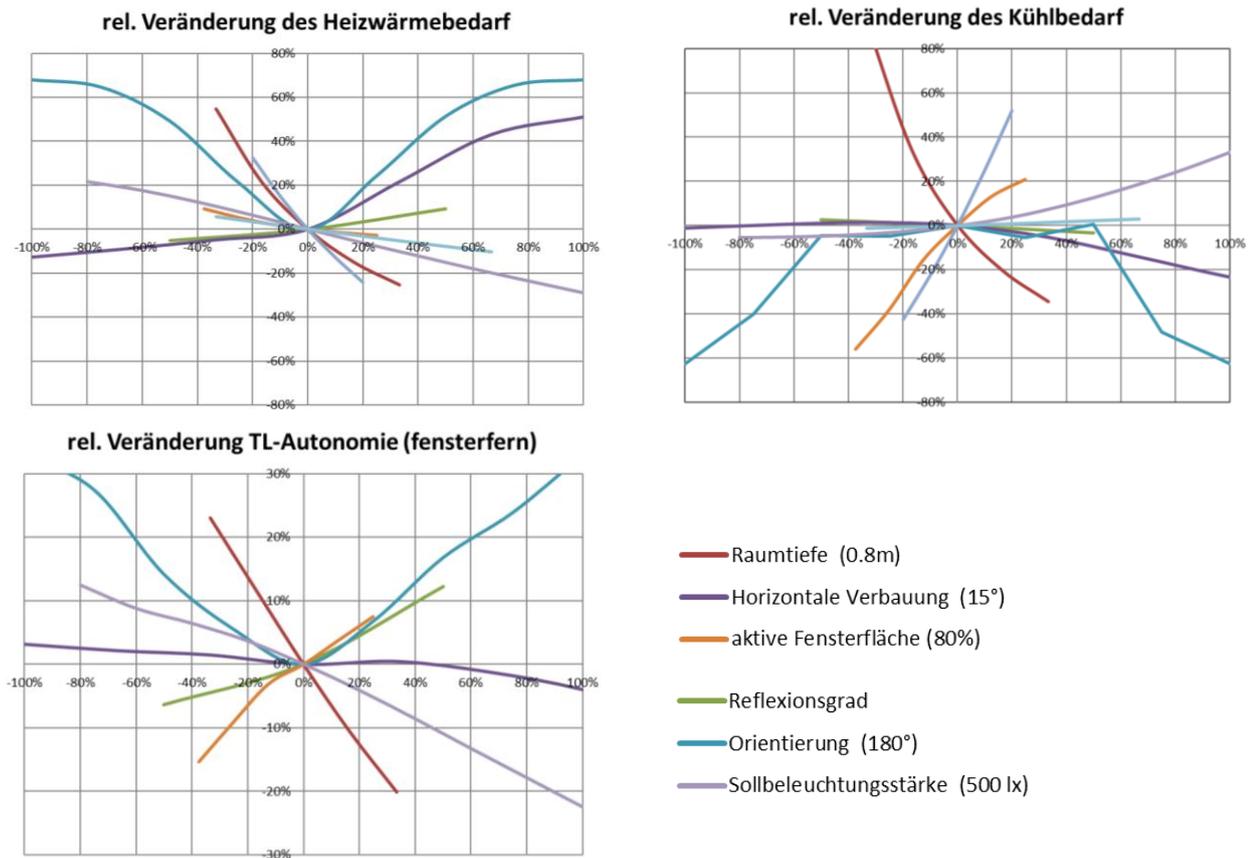
Der Programmcode eignet sich auch für Implementierungen in vergleichbaren Programmen zur dynamischen Gebäudesimulation. Die Entwicklungen aus lightSIMheat bieten daher einen allgemeinen Mehrwert für verbesserte Möglichkeiten zur thermisch und lichttechnisch gekoppelten Simulation in der dynamischen Gebäudemodellierung.

## 2.5 Entwicklung eines vereinfachten Berechnungsalgorithmus

Motivation dieser Entwicklung ist eine vereinfachte gekoppelte lichttechnische und thermische Bewertung mit Ziel der Implementierung in vorhandene in der Praxis verwendete Softwarelösungen. Ein vereinfachtes stündliches Berechnungsverfahren wird im FFG Forschungsprojekt DALEC entwickelt, so dass sich diese Arbeit auf ein vereinfachtes Tageslichtberechnungsverfahren für monatsbasierte Gebäudesimulationstools konzentrierte. Gerade monatsbasierte thermische Simulationstools sind in der Praxis international (wie zum Beispiel PHPP) weit verbreitet. Monatsbasierte thermische Simulationsprogramme verwenden keine stündlich aufgelösten Klimadaten, sondern greifen auf monatsweise kumulierte Strahlungsdaten zurück. Üblicherweise beinhalten diese thermischen Simulationsprogramme entweder keine Tageslichtsimulation oder verwenden stark vereinfachte Tageslichtberechnungsverfahren, um die internen Lasten aufgrund des Kunstlichtbedarfs zu ermitteln. Diese vereinfachten Verfahren sind entweder nicht klimabezogen, orientierungsunabhängig oder können keine komplexen Fassadensysteme mit einer notwendigen Verschattungssteuerstrategie berücksichtigen (Athienitis, 2002; de Boer, 2004; Lehar & Glicksman, 2007; Ng, 2001; Reinhart & LoVerso, 2010). Der ermittelte Kunstlichtbedarf wird dementsprechend überschätzt bzw. können die Vorteile von komplexen Fassaden nicht quantifiziert werden. Deshalb wurde basierend auf monatlichen Strahlungswerten vereinfachte Methoden entwickelt, die eine Ermittlung des Tageslichteintrags und somit auch der internen Lasten aufgrund des Kunstlichtbedarfes ermöglichen.

### 2.5.1 Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen

Zur Parameterbestimmung, welche einen direkten Einfluss auf die thermisch gekoppelte Simulation nehmen, wurde im Rahmen dieses Forschungsprojektes die Sensitivität von unterschiedlichen Fassaden-Raum- und Kunstlichtparameter auf den Heiz- Kühl- und Kunstlichtbedarf mittels eines stündlich lichttechnisch und thermisch im Zeitschritt gekoppelten Simulationsverfahren (Werner, Geisler-Moroder, Junghans, Ebert, & Feist, 2016) in einer vorgelagerten Studie untersucht. Es zeigen sich, die unterschiedlich starken Einflüsse der jeweiligen Parameter. Die Ergebnisse hierzu wurden zum einem in der Bachelorarbeit „Sensitivitätsanalysen von komplexen Fassadensysteme“ (Gopp, 2014) und in der Publikation „Vereinfachte Fassadenplanung hinsichtlich Kunstlicht-, Heiz- und Kühlbedarf“ (Werner, Gopp, Geisler-Moroder, Junghans, & Ebert, 2015) veröffentlicht. Exemplarisch wird in diesem Bericht die Sensitivität hinsichtlich dem Heizwärme- und Kühlbedarf und der Tageslichtautonomie für Passivhäuser in Abbildung 50 dargestellt. Die Parameter, die nicht vernachlässigt werden können, sind in der weiteren vereinfachten Algorithmenentwicklung berücksichtigt worden.



**Abbildung 50: Sensitivitätsanalyse von Fassaden- Raum- und Kunstlichtparameter auf Heizwärme- Kühlbedarf und der kontinuierlichen Tageslichtautonomie**

Des Weiteren konnte in den Publikationen gezeigt werden, dass neben der Sollbeleuchtungsstärke vor allem auch die Nutzungszeit einen großen Einfluss auf den Kunstlichtbedarf hat.

### 2.5.2 Ableitung eines vereinfachten Berechnungsalgorithmus

Basierend auf monatlichen Strahlungswerten wurden Berechnungsmethoden entwickelt, die eine Ermittlung des Tageslichteintrags und somit auch der internen Lasten aufgrund des Kunstlichtbedarfes ermöglichen.

Ein monatsbasierter Klima-Datensatz besitzt keine Information mehr über die zeitlich am Tag verteilte Strahlungsintensität. Der Kunstlichtbedarf ist jedoch sehr stark von der Tages- und Nutzungszeit und von der benötigten Sollbeleuchtungsstärke abhängig. Strahlungsdaten und insbesondere photometrische Daten (wie zum Beispiel: Beleuchtungsstärke) werden zeitlich über den Tag aufgelöst benötigt, um eine exakte Kunstlichtzuschaltung zu bestimmen. Die notwendige Umsetzung in dieser entwickelten Algorithmusentwicklung hierfür kann in drei Hauptschritte untergliedert werden:

1. Ermittlung der vorhandenen Tageslichtdosis im Innenraum
2. Tageszeitabhängige Gewichtung der Tageslichtdosis im Zeitschritt
3. Ermittlung der Kunstlichtzuschaltung

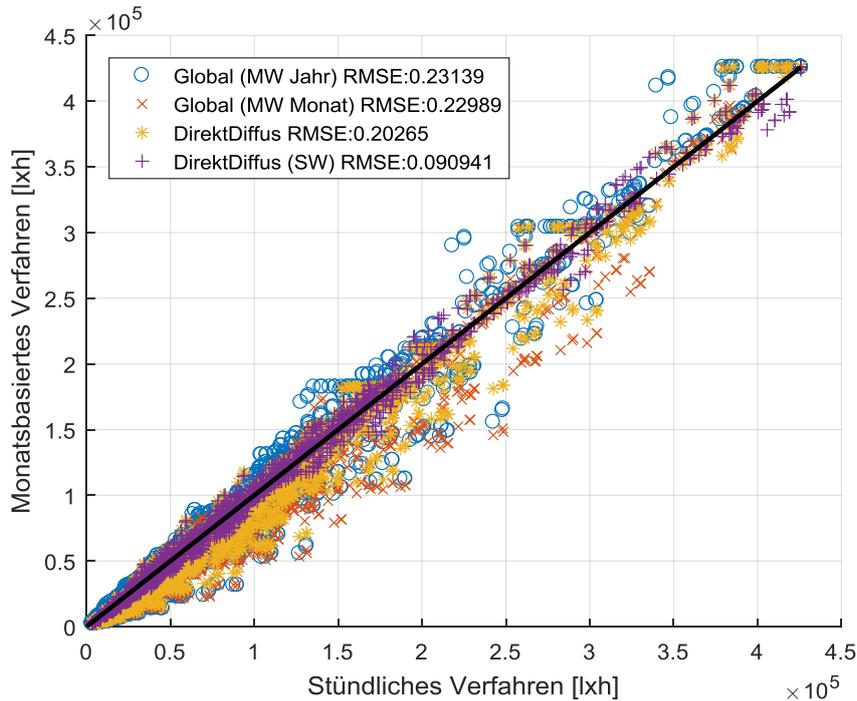
Diese drei Hauptschritte werden im Folgenden kurz erläutert:

- 1) Im Punkt 1 wird die im Monat verfügbare Innenraumtageslichtdosis bestimmt. Hierzu muss mittels eines stündlichen Verfahren der Tageslichtwirkungsgradfaktor von gewünschten Fassadensystem bestimmt und abgelegt werden. Der Tageslichtwirkungsgrad beschreibt den monatlich oder jährlich gemittelten Quotienten aus der Innenraumbeleuchtungsstärke und der gleichzeitig an der Fassade anliegenden Solarstrahlung. Liegt dieser Faktor vor kann dieser mit dem tatsächlichen monatlichen Globalstrahlungswert multipliziert werden. Man erhält die monatliche Tageslichtdosis im Innenraum.
- 2) Mittels Himmelsmodelle wird diese Tageslichtdosis über Referenztage verteilt. Man erhält eine zeitliche Zuordnung der Beleuchtungsstärken im Innenraum.
- 3) Aufgrund des zeitlich vorliegenden Tageslichteintrages kann dann die notwendige Kunstlichtergänzung für unterschiedliche Sollbeleuchtungsstärken, Nutzungszeiten und Kunstlichtlösungen und -strategien bestimmt werden.

Basierend auf dieser Methodik werden folgende vier Detailstufen untersucht:

- Jährlich gemittelter Tageslichtwirkungsgrad – Global (MW Jahr)
- Monatlich gemittelter Tageslichtwirkungsgrad – Global (MW Monat)
- Monatlich gemittelter Tageslichtwirkungsgrad bei Aufteilung der Direkt- und Diffusstrahlung – DirektDiffus (MW Jahr)
- Monatlich gemittelter Tageslichtwirkungsgrad bei Aufteilung der Direkt- und Diffusstrahlung und Berücksichtigung der Sonnenwahrscheinlichkeit – DirektDiffus (SW)

Diese Detailvarianten wurde mithilfe eines stündlichen Tageslichtberechnungsverfahren (Werner et al., 2016) evaluiert. Abbildung 51 stellt den Vergleich der ermittelten notwendigen Kunstlichtergänzung mit dem stündlichen Berechnungsverfahren dar. Es zeigt sich, dass mit jeder zusätzlichen Detailstufe auch die Genauigkeit des vereinfachten Berechnungsverfahren verbessert werden kann. Somit schneidet somit das Verfahren „DirektDiffus (SW)“, welches die Sonnenwahrscheinlichkeit berücksichtigt, am besten ab.



**Abbildung 51: Vergleich der notwendigen Kunstlichtzuschaltung mittels den entwickelten monatsbasierten Verfahren und der Referenz des stündlichen Tageslichtberechnungsverfahrens**

Mittels eines bewerteten RMSE (Root-Mean-Square-Error) kann jedoch gezeigt werden, dass alle vier Verfahren eine ausreichende Genauigkeit aufweisen.

Mit jeder weiteren Detailstufe steigt auch der Aufwand bei der Erzeugung der Tageslichtwirkungsgradfaktoren und notwendigen Strahlungsdaten. Abhängig von den verfügbaren monatlichen Strahlungsdaten kann das geeignete Berechnungsverfahren herangezogen werden.

Aufgrund der modularen Einbindung der Tageslichtwirkungsgradfaktoren können neue Fassadensysteme in die bestehende Methode integriert und bewertet werden. Desweiteren können Fassadensteuerstrategien berücksichtigt werden in dem der dazugehörigen Tageslichtwirkungsgrad angesetzt wird.

Die vorgestellte Methodik beruht auf einfachen Algorithmen und kann mittels jeder Programmiersprache (auch Excel) umgesetzt und somit auch in bestehende thermische Planungstools implementiert werden. Somit kann der gekoppelte Einfluss des Tageslichteintrages und des damit verbundenen Kunstlichtbedarfs auch bei komplexen Fassadensystemen in vereinfachten thermischen Simulationsprogrammen in Zukunft berücksichtigt werden.

### 3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

#### 3.1 Ergebnisse des simulationsgestützten Messverfahrens

##### 3.1.1 Aufbau eines Validierungsmodells zur theoretischen Prüfung des Messverfahrens

Nach erfolgreicher Umsetzung des simulationsgestützten Messverfahrens wurde dieses an ausgewählten Validierungssystemen auf Funktionalität erprobt. Im selben Verlauf wurden die entwickelten Simulationsmethoden zur thermischen Abbildung von komplexen Verglasungssystemen anhand der gewonnenen Messdaten validiert. Die Erkenntnisse daraus geben Aufschluss darüber, in wie weit eine detaillierte Beschreibung der zu analysierenden Systeme notwendig ist um aussagekräftige Ergebnisse aus der Modellierung zu erhalten. Vereinfachungen für die Modellspezifikation konnten daraus abgeleitet werden. Es wurden sowohl diffus streuende Lamellensysteme als auch hochreflektierende Tageslichtlenksysteme und komplexen Geometrien vermessen und analysiert. Im Vergleich mit der Modellrechnung wurden so gezielt Stärken und Schwächen in der Modellierung komplexer Systeme erarbeitet.

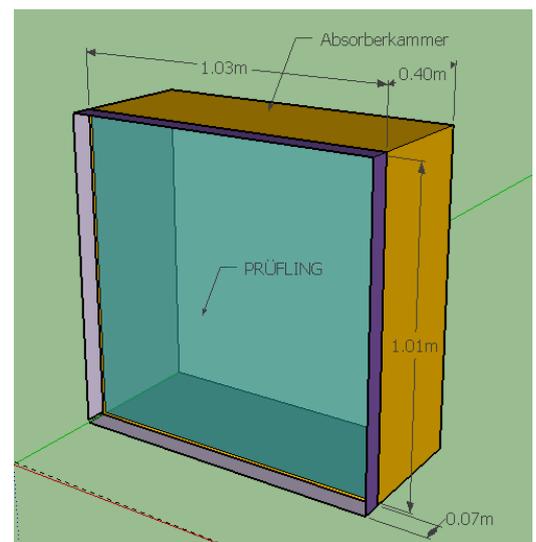
Um einen Vergleich mit der Simulation zu ermöglichen, wurde der Prüfstands Aufbau inkl. Klimakammer, Absorber und Prüfling anhand eines vereinfachten 1-Zonenmodells in TRNSYS (Type56) nachgebildet (Abbildung 52). Die Klimakammer wurde idealisiert adiabatisch angenommen. Die thermische Zone im Modell fungiert zugleich als idealer Absorber, indem ideales Kühlen aktiviert wird. Der Prüfling ist als Verglasungsfläche im Modell berücksichtigt, die Berechnung erfolgt anhand des detaillierter Modells nach der ISO 15099 und integrierter BSDF. Die Einstrahlleistung wird normal auf die Verglasung aufgeprägt und bereits vorher durch den Transmissionsgrad ( $\tau = 0.915$ ) der vorgelagerten Prallscheibe im Prüfstand reduziert. Der simulierte g-Wert wurde durch folgenden Zusammenhang aus dem resultieren Kühlbedarf ermittelt:

**Abbildung 52: Simulationsmodell der g-Wert Messkammer**

$$SHGC_{measured} = \frac{\dot{Q}_{in}}{E * A}$$

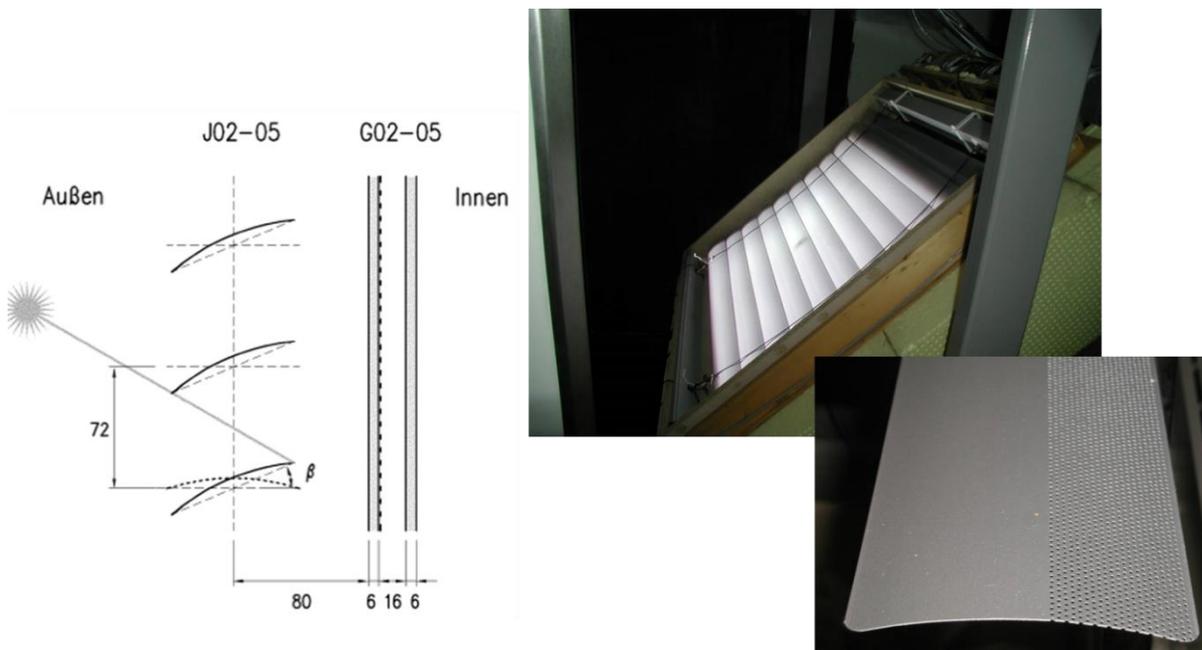
##### 3.1.2 Statische Validierungsmessung im g-Wert Prüfstand

Im folgende sind die vermessenen Systeme kurz angeführt (Geometrie und Materialeigenschaften der Lamelle, kombinierte Verglasung) sowie deren vermessene Betriebspunkte dokumentiert. Ziel war es zum einen die erarbeiteten Methoden aus AP2 und AP4 zur Bestimmung der Modellinputparameter zu prüfen und zum anderen den simulierten g-Wert gegen die gemessenen g-Werte zu validieren.



**Validierungssystem 1: WAREMA E80, teilperforiert, diffus reflektierend**

Das System ermöglicht die Modellvalidierung durch ein außenliegendes Verschattungssystem. Die Lamelle ist diffus reflektierend und mit einfach gekrümmter Geometrie ausgeführt, eine vollständige thermische Modellierung durch die ISO15099 ist möglich. Die Teilperforierung ist durch einen zusätzlichen Transmissionsgrad des Lamellenmaterials abgebildet.



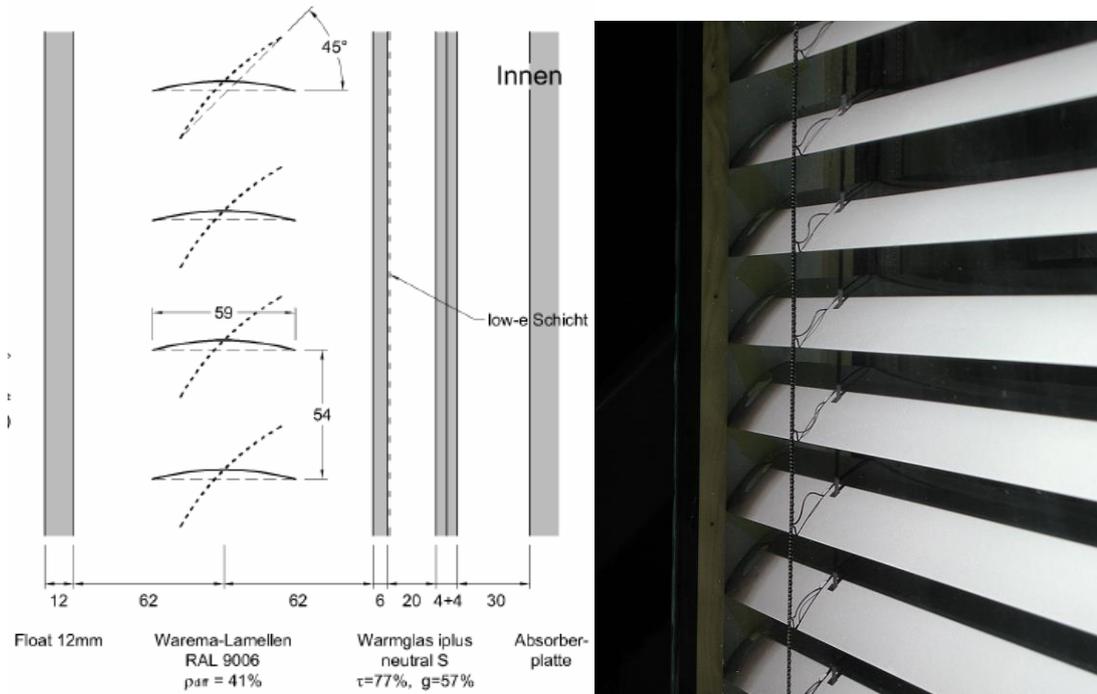
**Abbildung 53: Validierungssystem 1: Warema Raffstore E80, extern**

**Tabelle 5: Spezifikation und vermessene Betriebspunkte, Warema Raffstore E80**

CFS specification	System 1a	System 1b	System 1c
<b>Slat geometry</b>			
Slat width	80.0 mm	80.0 mm	80.0 mm
Spacing	72.0 mm	72.0 mm	72.0 mm
Blind thickness	80.0 mm	56.6 mm	20.7 mm
Rise	6.517 mm	6.517 mm	6.517 mm
Tilt angle	0°	45°	75°
<b>Slat material</b>			
Slat material (f=b)	RAL9006	RAL9006	RAL9006
Slat reflectance (f=b)	0.48	0.48	0.48
Slat transmittance (f=b)	0.09	0.09	0.09
Slat emissivity (f=b)	0.84	0.84	0.84
<b>thermal blind layer properties</b>			
Effective Emittance	0.566 / 0.566	0.656 / 0.657	0.79 / 0.79
IR-transmittance	0.398	0.301	0.085
openness factor	0.95	0.5	0.05

**Validierungssystem 2: WAREMA E60, solid, diffus reflektierend**

Das System ermöglicht die Modellprüfung für ein im Scheibenzwischenraum liegendes Lamellensystem. Die Lamelle ist diffus reflektierend und mit einfach gekrümmter Geometrie ausgeführt, eine vollständige thermische Modellierung durch die ISO 15099 ist möglich.

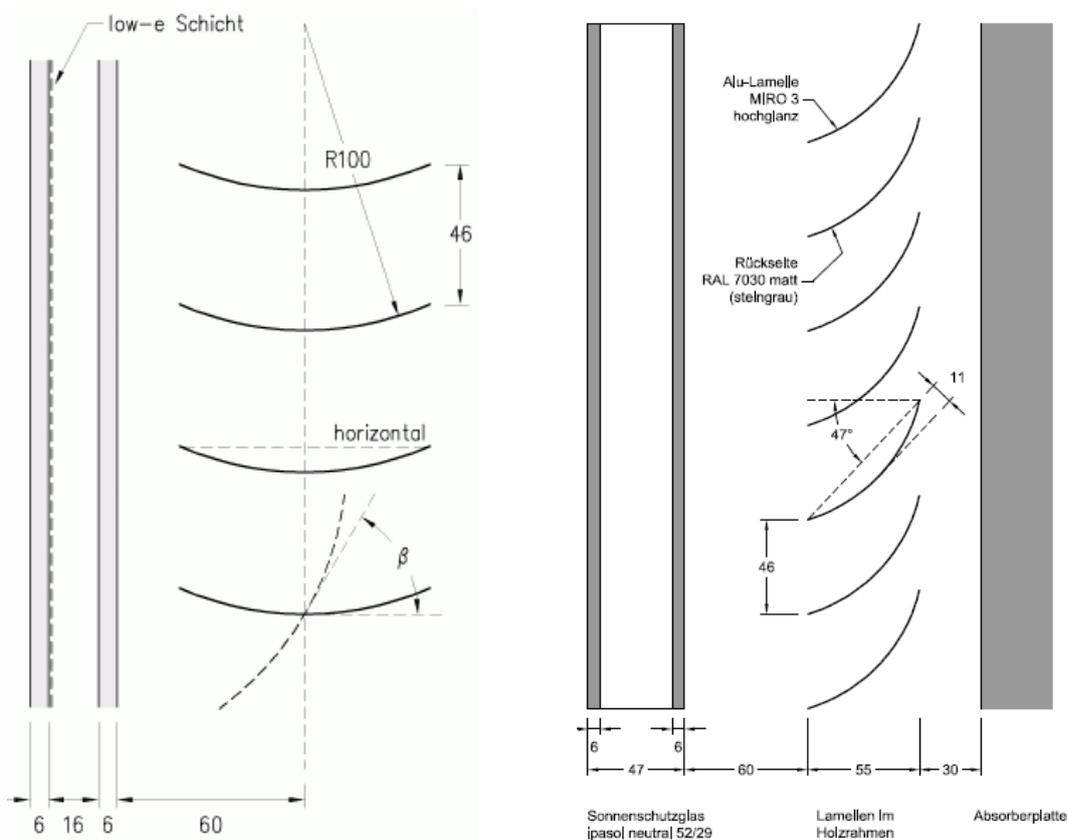


**Abbildung 54: Validierungssystem 2: Warema Raffstore E60, zwischenliegendes System**

**Tabelle 6: Spezifikation und vermessene Betriebspunkte, Warema Raffstore E60**

CFS specification	System 2a	System 2b	System 2c
<b>Slat geometry</b>			
Slat width	60.0 mm	60.0 mm	60.0 mm
Spacing	54.0 mm	54.0 mm	54.0 mm
Blind thickness	60.0 mm	42.4 mm	5.2 mm
Rise	7.351 mm	7.351 mm	7.351 mm
Tilt angle	0°	45°	85°
<b>Slat material</b>			
Slat material (f=b)	RAL9006	RAL9006	RAL9006
Slat reflectance (f=b)	0.41	0.41	0.41
Slat transmittance (f=b)	0.00	0.00	0.00
Slat emissivity (f=b)	0.84	0.84	0.84
<b>thermal blind layer properties</b>			
Effective Emittance	0.577 / 0.577	0.656 / 0.672	0.845 / 0.854
IR-transmittance	0.354	0.263	0.069
Openness factor	0.95	0.5	0.05

**Validierungssystem 3: WAREMA E80, solid, spiegelnd, konkav gekrümmt**



**Abbildung 55: Validierungssystem 3: Warema Raffstore E80, innenliegend, zwischenliegendes System**

**Tabelle 7: Spezifikation und vermessene Betriebspunkte, Warema Raffstore E80 "Miro3"**

System definition	System 3a	System 3b
<b>Slat geometry</b>		
Slat width	60.0 mm	60.0 mm
Spacing	54.0 mm	54.0 mm
Blind thickness	60.0 mm	42.4 mm
Rise	7.351 mm	7.351 mm
Tilt angle	0°	45°
<b>Slat material</b>		
Slat material (f=b)	RAL9006	RAL9006
Slat reflectance (f=b)	0.41	0.41
Slat transmittance (f=b)	0.00	0.00
Slat emissivity (f=b)	0.84	0.84
<b>thermal blind layer properties</b>		
Effective Emittance	0.466 / 0.757	0.441 / 0.813
IR-transmittance	0.178	0.057
Openness factor	0.5	0.35

### 3.1.3 Ergebnisse mit Modellvergleich

**Tabelle 8: Vergleichsresultate: Simulierte vs. gemessene g-Werte**

$\varphi_s$	$\gamma_s$	$\beta$	SHGC-meas (measured)	SHGC-sim (by NTYPE)	SHGC-sim (by QCOOL)
<b>Validierungssystem 1: Warema Raffstore E80, extern</b>					
0°	0°	75°	11 %	10.52 %	10.45 %
0°	45°	75°	10 %	9.90 %	9.84 %
0°	30°	45°	13 %	8.98%	8.94 %
0°	30°	45°	13 %	8.98%	8.94 %
0°	45°	0°	19 %	12.32 %	12.24 %
<b>Validierungssystem 2: Warema Raffstore E60, zwischenliegendes System</b>					
10°	0°	85°	10 %	9.98 %	9.75 %
0°	45°	0°	18 %	16.03 %	15.72 %
0°	45°	45°	11 %	11.02 %	11.26 %
<b>Validierungssystem 3: Warema Raffstore E80, innenliegend, zwischenl. System</b>					
0°	60°	45°	14 %	18.02 %	17.97 %
0°	45°	65°	18-19%	19.85 %	19.87 %

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der ermittelten Messdaten stationärer g-Werte verglichen mit den stationären Simulationsergebnissen dargestellt. Die Modellierung des Messaufbaus erfolgte gemäß der Modellbeschreibung nach Abbildung 52, der Modellspezifikation des komplexen BSDF/ISO-Modells anhand der tabellarischen Beschreibungen zu den Validierungssystemen (Tabelle 5 - Tabelle 7). Die Auswertung des simulierten g-Wertes erfolgte anhand des ermittelten Kühlbedarfs gemäß (5). Zusätzlich ist noch der g-Wert angeführt, welcher durch das BSDF/ISO-Modell intern ausgegeben wurde.

Für das externe Raffstore konnte eine sehr gute Übereinstimmung speziell für Messungen mit geschlossenem Lamellenbehang erzielt werden. Deutliche Abweichungen zeigten sich für halb geöffnete (45°) und geöffnete (0°) Lamellenpositionen bei gleichzeitig geneigter Einstrahlung. Grund für die deutliche Unterschätzung des g-Wertes liegt in der vereinfachten Abbildung der Perforierung der Lamellenoberfläche. Entgegen der partiell ausgeführten Perforierung an der realen Lamelle berücksichtigt die simulierte eine gleichmäßige Perforierung über die gesamte Lamellenfläche (absolut allerdings ident zum realen Perforierungsanteil). Für eine exakte Modellierung wäre eine solare BSDF der Lamelle notwendig, welche allerdings nicht verfügbar war.

Für System 2 konnte in allen Fällen eine ausgezeichnete Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation erzielt werden, unabhängig von Lamellenstellung und Einstrahlungsrichtung. Es bestätigt sich, dass im Scheibenverbund integrierte Lamellensysteme sehr gut modelliert werden können, da der

abgeschlossene SZR einen klar definierten und thermisch abgeschlossenen Bereich darstellt hinsichtlich konvektiver und strahlungstechnischer Wechselwirkungen.

Ebenso für die innenliegende Spiegellamelle (System 3) konnte eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen gemessenem und simulierten g-Wert erreicht werden. Eine erhöhte Abweichung im Vergleich zum integrierten System kann aus Sicht des Messaufbaus wiederum durch den erhöhten Störeinfluss durch unklar definierte Randbedingungen (konvektiver Wärmeübergang, Strahlungspartner...).

Zusammenfassend konnte durch die stationären Messvergleiche gezeigt werden, dass bei großer Varianz der Systemkonfigurationen (außenliegend, integriert, innenliegend, variable Lamellenstellungen), Materialdefinitionen (diffus reflektierend, verspiegelt, perforiert) und variierenden Einstrahlbedingungen eine sehr hohe Übereinstimmung der Berechnungen mit dem umgesetzten Modell nach ISO15099 Algorithmen und solarer BSDF Integration mit den Messungen erreicht werden kann.

### 3.2 Ergebnisse zur lichttechnischen Modelloptimierung

Die erweiterte Simulationsmethodik der Five-Phase-Method wurde gegen Messdaten aus dem FLEXLAB am Lawrence Berkeley National Laboratory in Kalifornien, USA, validiert. Dafür wurden sowohl Auswertungen von Beleuchtungsstärkesensoren (horizontale und vertikale Beleuchtungsstärken) als auch Auswertungen von Blendwahrscheinlichkeiten, welche sich aus HDR-Bildern berechnen lassen, durchgeführt.

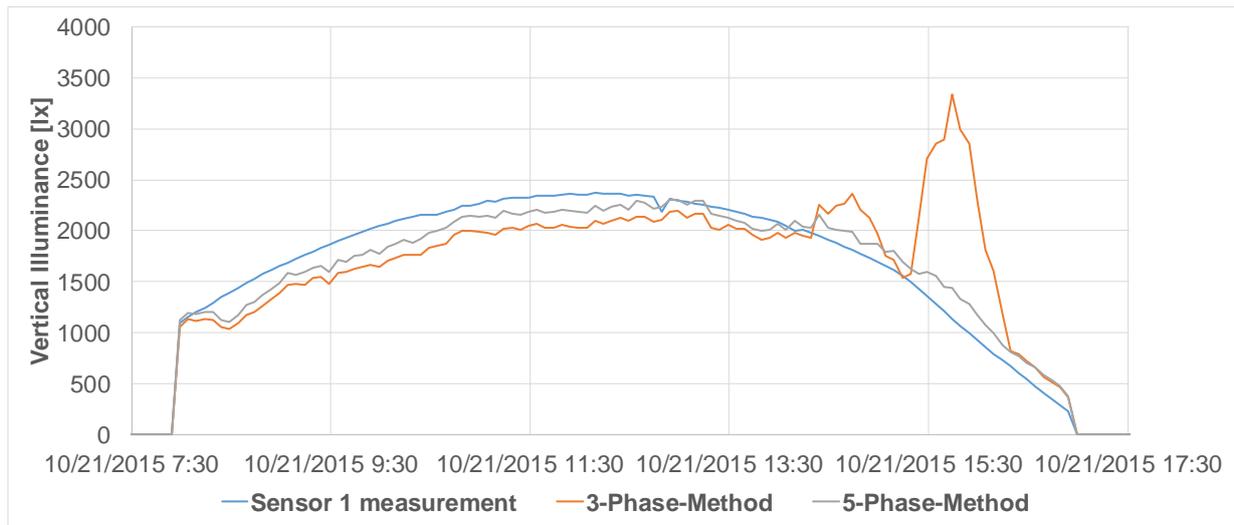


Abbildung 56: Auswertung der vertikalen Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz

Exemplarische Auswertung der vertikalen Beleuchtungsstärken am Arbeitsplatz (Abbildung 56). Auffallend ist die fehlerhafte Berechnung am Nachmittag mit der Three-Phase-Method, bei der die Sonne auf große Raumwinkelbereiche aufgeteilt wird und dadurch durch die abschattenden Lamellen gelangt.

Die Auswertung der Blendungswahrscheinlichkeit DGP (Abbildung 57) zeigt wie schon für die vertikale Beleuchtungsstärke den Fehler bei der Berechnung mit der Three-Phase-Method, der durch die verbesserte Abbildung des direkten solaren Anteils in der Five-Phase-Method gelöst wird.

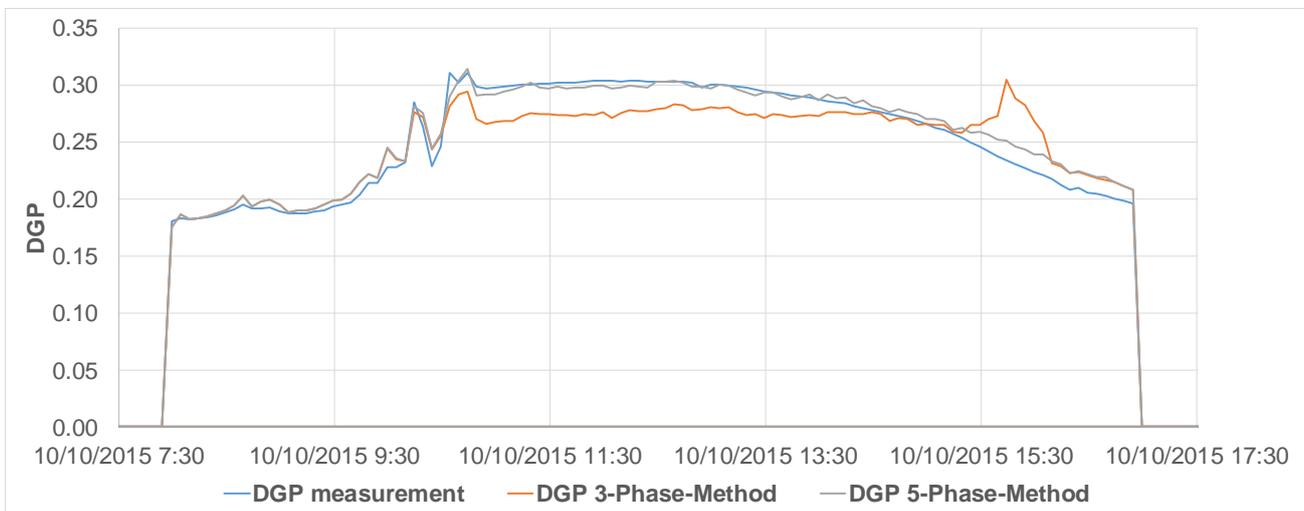


Abbildung 57: Auswertung zum Vergleich der Blendungsbewertung

In der Validierung wurden auch verschiedene Inputdaten für das in der Simulation verwendete Himmelsmodell geprüft. Die gezeigten Evaluierungen basieren dabei auf im Außenraum gemessenen globalen und diffusen Bestrahlungsstärken, die über das Perez Himmelsmodell in Leuchtdichteverteilungen für die Simulation übergeführt werden. Bereits hier zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen zwischen den gemessenen und simulierten Werten, wodurch indirekt auch auf eine sehr gute Modellbildung im Perez-Modell geschlossen werden kann.

Ein Vergleich mit Inputdaten aus dem „Skyometer“, ein High-End Datenerfassungssystem für Himmelszustände, zeigt, dass die Übereinstimmung der Simulationen mit den Messergebnissen zwar noch leicht gesteigert werden kann, Kosten und Aufwand den Mehrwert für die breite Anwendung aber nicht rechtfertigen.

Eine Recherche zum Thema spektrale Einflüsse und Polarisierungseffekte ergab, dass in Ausnahmefällen zwar Abhängigkeiten vorhanden sind, für die Tageslichtsimulation im Allgemeinen diese Effekte jedoch vernachlässigbar sind. Im Detail analysiert wurde dies z.B. von Proietti (2017).

Die Erhöhung der Komplexität und der notwendigen Datenbasis für eine Routine wie ARTLIGHT, bei der der Fokus auf der gekoppelten energetischen und lichttechnischen Berechnung liegt, wäre jedoch nicht zielführend.

### 3.3 Ergebnisse zur thermischen Modellvalidierung durch Simulation

#### 3.3.1 Referenzraumdefinition

Für die thermischen Validierungssimulationen wurde die Referenzraumgeometrie nach Abbildung 58 in SketchUp modelliert und als 3D-Modell in TRNSYS Type56 importiert. Der dargestellte Raum repräsentiert ein Büro mit Doppelbelegung aus einem größeren Gebäudekomplex. Innenwände, Boden und Decke sind daher adiabat ausgeführt, die Fassade mit 60% Verglasungsanteil und opaker Brüstung im unteren Bereich ist mit Außenbedingungen beaufschlagt. Der Gebäudestandard entspricht Passivhausstandard - detaillierte Definitionen zu Wandaufbauten sind aus (Werner M. et al. 2010) zu entnehmen.

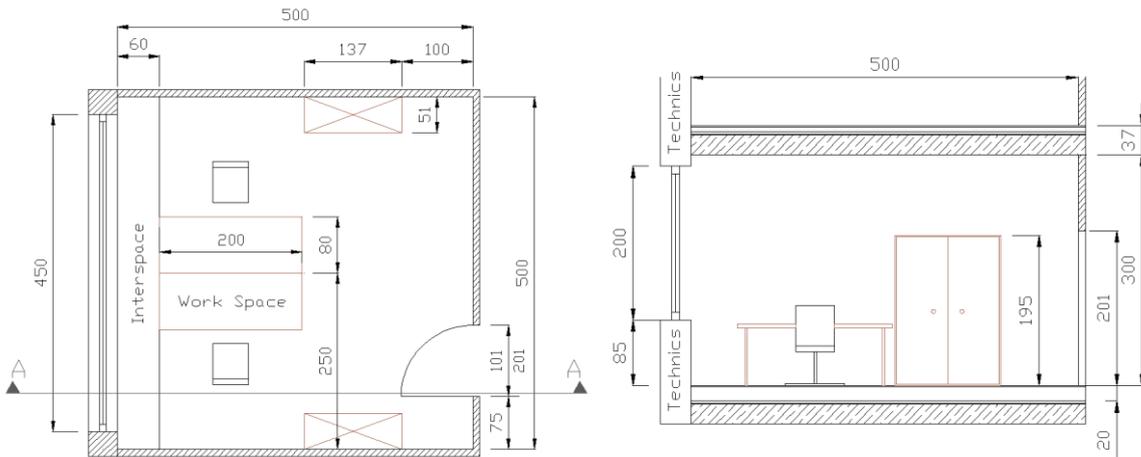


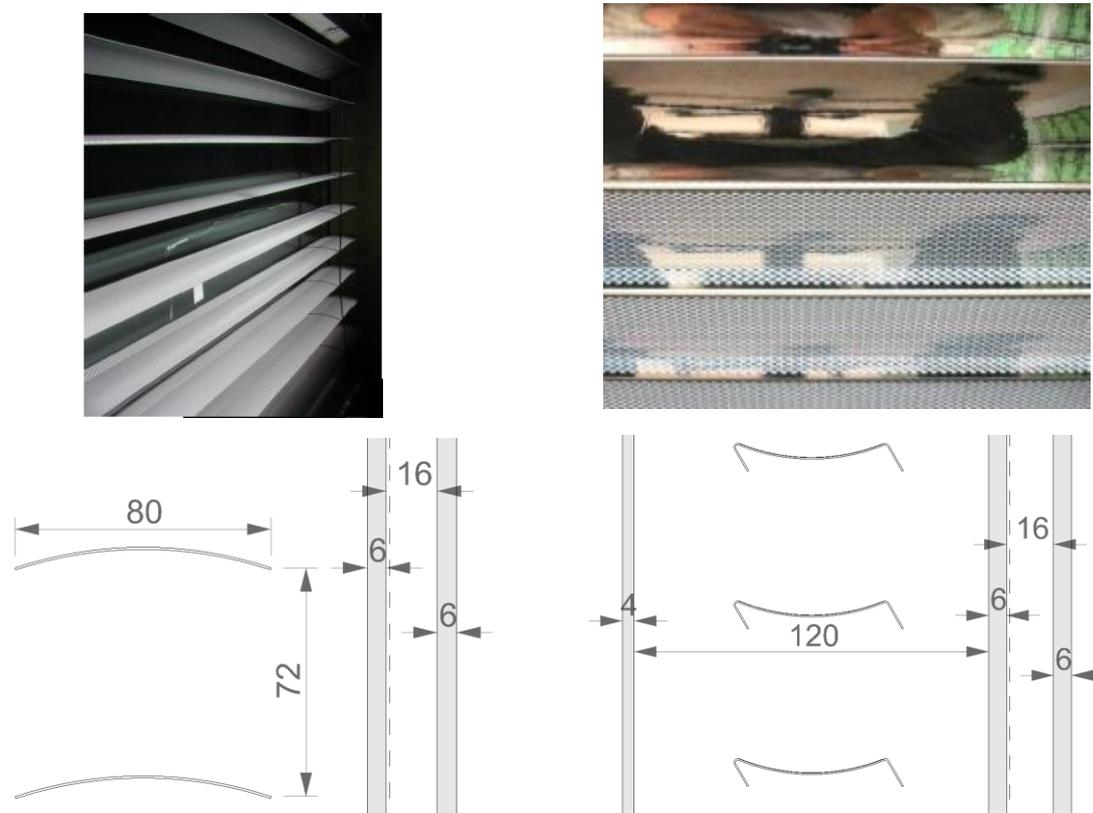
Abbildung 58: Referenzraumdefinition - Doppelbüro

Die Definition interner Lasten sowie die Nutzerprofile für Belegungszeiten sind an die SIA2024 angelehnt und als wöchentliches Profil in die Simulation implementiert. Die Anschlussleistung für Kunstlicht ist in diesem Modellvergleich konstant mit 10W/m<sup>2</sup> während Belegungszeiten definiert. In weiterer Folge wird diese Referenzraumdefinition für die Fallstudienanalyse in AP7 mit der gekoppelten Simulationsroutine Artlight aus AP5 verwendet. In diesem Fall wird die hier verwendete konstante Kunstlichtzuschaltung durch das Ergebnis für die tageslichtabhängige Kunstlichtzuschaltung ersetzt.

Tabelle 9: Spezifikationen Referenzsystem für thermische Simulation

Parameter	Definition	Source
Climate	Innsbruck, Austria	
U-value wall $U_{wall}$	0.15 W/m <sup>2</sup> K	Assumption
U-value window $U_{window}$	0.8 W/m <sup>2</sup> K	Assumption
Window surface	9 m <sup>2</sup> (Width: 4.5 m, Height: 2 m)	Assumption
Glazing part on the façade area	60 %	SIA 2024
Sensible heat emissions	70 W/person (at 24 °C)	SIA 2024
Room occupancy	1 Person/12,5m <sup>2</sup>	
Average moisture discharge	80 g/(h person) (at 24 °C)	SIA 2024
Operating hours:	Monday to Friday – 7 a.m. to 6 p.m.	SIA 2024
Internal loads (equipment)	9.6 W/m <sup>2</sup>	SIA 2024
Room temperatures	21 °C (heating), 26 °C (cooling)	SIA 2024
Ventilation - air change rate	0.96 h <sup>-1</sup>	SIA 2024
Visual reflectance of ceiling/walls/floor	80 % / 50 % / 30 %	Assumption
Luminous efficacy of artificial light	70 lm/W	Assumption

### 3.3.2 Validierung der vereinfachten Modellansätze gegen das BSDF/ISO-Modells

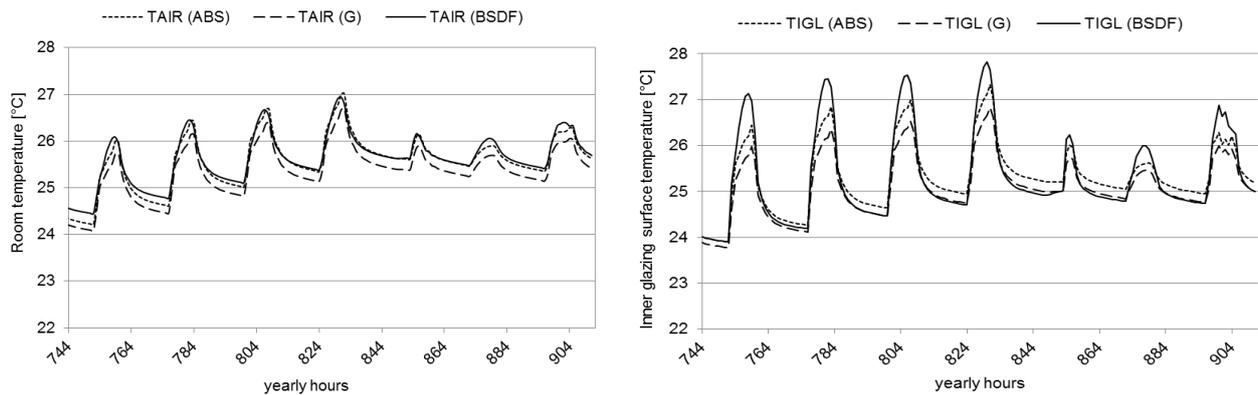


**Abbildung 59: Verwendete Validierungssysteme: System 1: externer Raffstore (links), System 2: Lichtlenksystem mit verspiegeltem und perforiertem Lamellenbehang (rechts)**

Für den Vergleich der vereinfachten Ansätze gegen das detaillierte BSDF/ISO-Modell wurden anhand der dargestellten System in Abbildung 59 wiederum statische, quasi-statische sowie dynamische Ganzjahressimulationen für die Standorte Innsbruck, Oslo und Amman durchgeführt. Zusätzlich wurde die außenorientierte Fassade für die Orientierungen Süd, Ost und West ausgewertet, um die Genauigkeit bei möglichst flexibler Anwendung in der Jahressimulation nachzuweisen. Die Auswertung im stationären Fall erfolgte anhand resultierender g-Werte im eingeschwungenen Zustand. Für den quasi-statische Fall sowie die dynamische Ganzjahressimulation wurden Heiz-/Kühlbedarf, Raumtemperaturen sowie innere Verglasungstemperaturen gegeneinander verglichen.

Der Modellvergleich anhand statischer Berechnungsergebnisse hat keine zufriedenstellenden Ergebnisse gebracht. Eine große Varianz in den Abweichungsergebnissen ohne klar erkennbare Trends ließ keine allgemein gültige Aussage über Modellgenauigkeit zu. Es zeigte sich, dass die vereinfachten Ansätze für spezifische Auswertungen keine verlässlichen Aussagen ermöglichen. Aus den Ergebnisse zu den quasi-statischen und dynamischen Untersuchungen konnten wesentlich klarere Ergebnisse abgeleitet werden, da durch die Langzeitbetrachtung punktuelle Abweichungen im Mittel vernachlässigbar wurden. In Abbildung 60 sind dazu dynamische Temperaturverläufe für Raumtemperatur und innere

Verglasungstemperatur für eine repräsentative Woche im Februar dargestellt. Die Verläufe für die Raumtemperatur von Abs-Modell und g-Modell zeigen dabei eine sehr gute Übereinstimmung mit dem BSDF/ISO-Modell. Ebenso zeigen sich Einschränkungen in der Modellierung der Scheibentemperatur – die vereinfachten Modelle unterschätzen dabei die auftretenden Temperaturspitzen. Für detaillierte Systembetrachtungen und Komfortauswertungen sind die vereinfachten Ansätze daher nur bedingt geeignet.



**Abbildung 60: Ergebnisse quasi-statischer Vergleich: Temperaturverlauf**

In Abbildung 61 ist eine weitere Ergebniszusammenfassung aus der dynamischen Ganzjahresbewertung dargestellt. Die Gegenüberstellung der simulierten Raumtemperaturen in sortierter Form zeigt, dass alle vereinfachten Modelle bei offener Lamellenstellung sehr gute Ergebnisse liefern, mit zunehmendem Abschattungsanteil zeigt das FC-Modell deutliche Schwächen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass bei diesem Modell die sekundäre Wärmeabgabe unzureichend abgebildet wird. Das g-Modell hingegen bringt auch bei hohem Abschattungsgrad sehr gute Ergebnisse.

In Abbildung 62 sind die Ergebnisse für Raumtemperaturen der vereinfachten Modelle den Ergebnissen des BSDF/ISO-Modells auf der linken Spalte gegenübergestellt. Rechts davon ist jeweils die Temperaturabweichung im Jahresverlauf dargestellt. Während alle Modelle brauchbare Ergebnisse in den Sommermonaten liefern, zeigen alle Modelle eine deutliche Abweichung in den Wintermonaten. Dabei unterschätzen Abs-Modell und g-Modell die Temperaturen leicht, das Fc-Modell hingegen überschätzt die Temperaturen deutlich. Nachdem das hier betrachtete System im SZR positioniert ist, führt die absorbierte Energie in der Lamelle zur Erwärmung der Systemtemperatur, was die Wärmeverluste im Winter reduzieren lässt. Das Unterschätzen der Scheibentemperaturen der vereinfachten Modelle wirkt sich daher für diese Art von Systeme noch deutlicher aus.

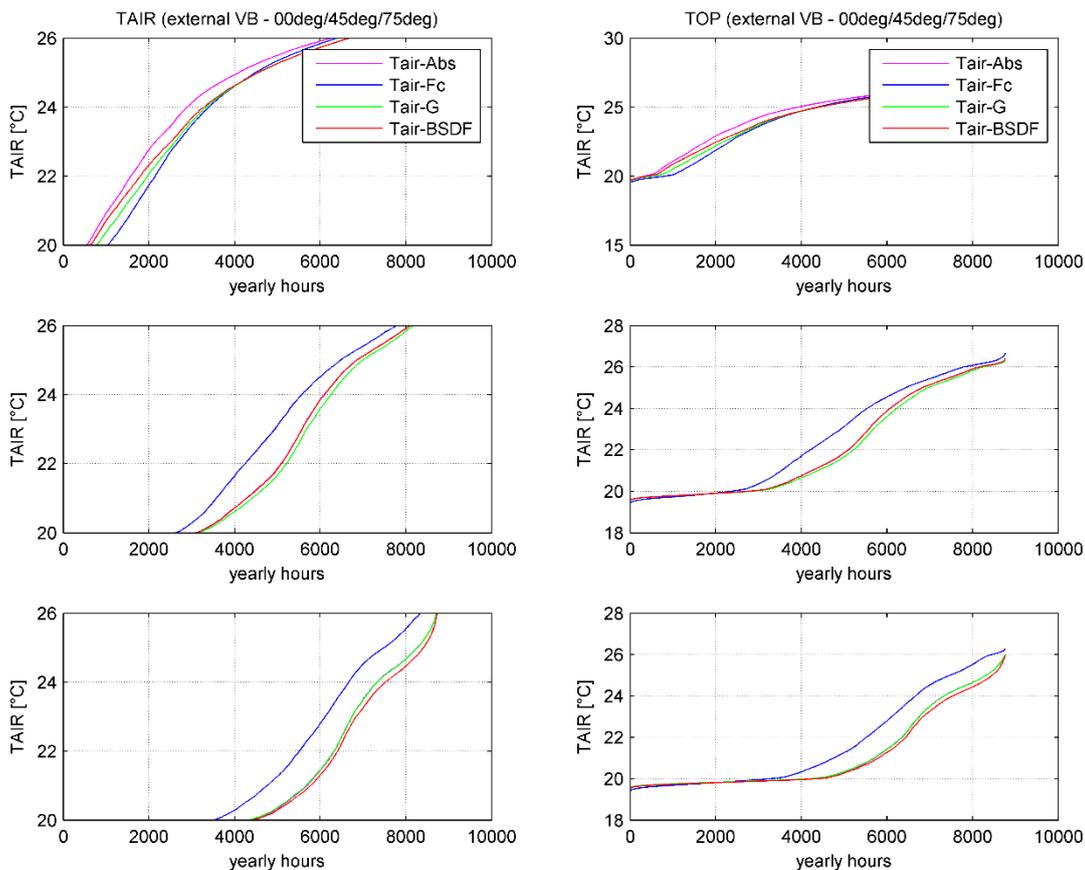


Abbildung 61: Vergleich: sensible und operative Raumtemperatur für außenliegendes Raffstore

Tabelle 10: Heiz-/Kühlbedarf, externer Raffstore (diffus reflektierend)

South	Heating balance [kWh/m²a]				Cooling balance [kWh/m²a]			
	ABS	FC	G	BSDF	ABS	FC	G	BSDF
Slat angle								
0°	16.22	22.74	18.07	16.62	29.73	30.76	22.55	24.10
45°	27.17	32.33	27.90	27.33	4.80	9.08	3.91	4.71
75°	34.01	38.46	33.89	36.24	0.13	2.95	0.12	0.00
<b>East</b>								
	ABS	FC	G	BSDF	ABS	FC	G	BSDF
0°	3.58	8.40	5.12	4.06	31.51	30.81	21.75	22.80
45°	24.20	25.10	24.50	24.31	4.27	8.27	3.56	4.25
75°	33.29	33.11	32.81	34.88	0.12	2.42	0.13	0.00
<b>West</b>								
	ABS	FC	G	BSDF	ABS	FC	G	BSDF
0°	29.31	30.34	22.31	24.80	16.62	23.05	18.55	17.14
45°	4.83	9.14	3.95	4.79	27.45	32.87	28.24	27.67
75°	0.15	2.95	0.15	0.00	34.07	38.88	24.02	36.36

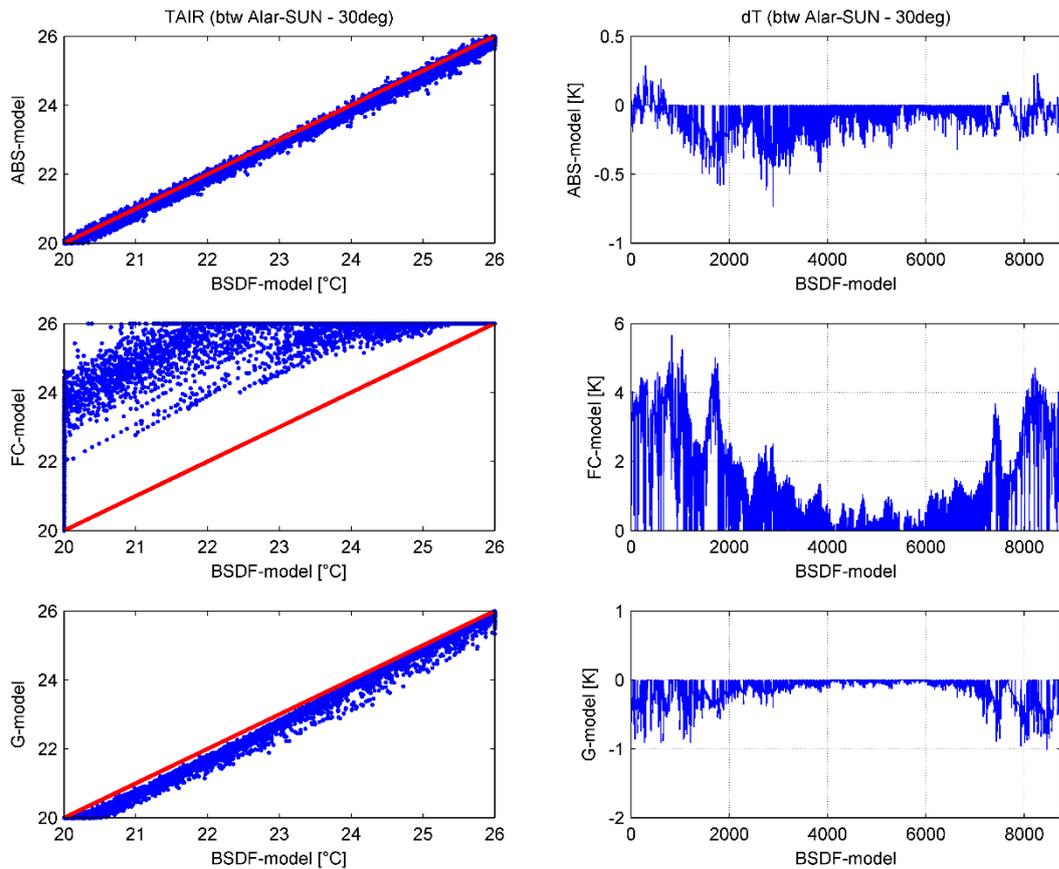


Abbildung 62: Vergleich simulierte Raumtemperaturen, Spiegellamelle perforiert

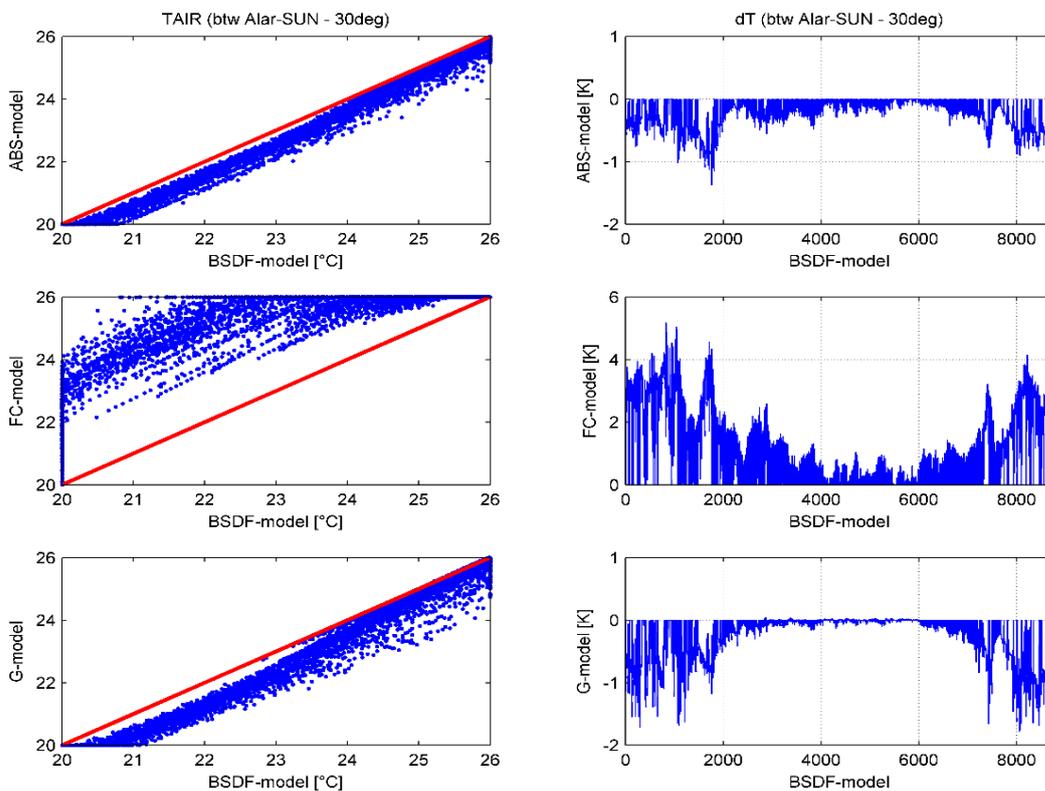


Abbildung 63: Vergleich simulierte Raumtemperaturen, Spiegellamelle solid

Bisherige Betrachtungen haben sich auf südorientierte Fassaden bezogen. Selbige Systeme zeigen identes, zum Teil besseres Verhalten für ost- bzw. westorientierte Fassaden. Die Auswertungen wurden erfolgreich auch für den Standort Amman durchgeführt. Die vereinfachten Modelle haben daher keine Einschränkung hinsichtlich deren Anwendung auf unterschiedliche Orientierungen und Standorten. Bei Betrachtung der inneren Verglasungstemperaturen zeigen sich sowohl für das außenliegende Raffstore, besonders aber für die zwischenliegende Spiegellamelle Ergebnisabweichungen. Das Fc-Modell liefert in keinem Fall valide Ergebnisse für eine richtige Bewertung der Scheibentemperaturen.

**Tabelle 11: Heiz-/Kühlbedarf, Tageslichtlenklamelle (spiegelnd)**

South	Heating balance [kWh/m²a]				Cooling balance [kWh/m²a]			
	ABS	FC	G	BSDF	ABS	FC	G	BSDF
Slat angle								
0°	1.47	0.07	1.90	0.85	62.44	--	55.35	67.54
30°	2.82	0.02	3.40	1.98	26.94	--	28.55	32.85
45°	2.19	0.61	9.00	10.44	14.29	--	12.67	13.64
60°	11.45	7.53	18.45	17.75	5.70	--	5.54	5.62
90°	19.77	19.77	27.88	27.14	0.37	4.86	0.49	0.27
<b>East</b>								
	ABS	FC	G	BSDF	ABS	FC	G	BSDF
0°	11.92	1.11	12.15	9.49	43.75	--	41.99	50.51
30°	15.10	3.03	14.21	12.16	24.82	--	27.72	31.68
45°	9.22	6.81	16.51	17.85	16.35	--	15.03	13.36
60°	13.85	13.27	22.02	21.02	5.85	--	6.04	6.21
90°	19.80	24.63	29.91	28.61	0.37	4.14	0.44	0.31
<b>West</b>								
	ABS	FC	G	BSDF	ABS	FC	G	BSDF
0°	12.35	1.25	12.48	9.89	42.08	--	40.53	49.00
30°	15.48	3.35	15.48	12.49	24.41	--	26.49	30.68
45°	9.36	7.00	19.33	17.87	16.43	--	14.90	13.80
60°	14.03	13.49	24.02	21.38	8.90	--	6.18	6.30
90°	19.80	24.67	30.20	28.80	0.37	4.15	0.48	0.34

In Tabelle 10 und Tabelle 11 sind die resultierende Heiz- und Kühlbedarfe pro Lamellenstellung und Orientierung für das außenliegende Raffstore mit diffuser Reflexionseigenschaft sowie für die zwischen der Verglasung liegenden Spiegellamelle angeführt. Die Ergebnisse bestätigen, dass die vereinfachten Modelle systemunabhängig ausreichende Genauigkeit bieten, um eine plausible Abschätzung der Energiebilanz zu ermöglichen.

### 3.3.3 Resümee

Innerhalb dieses Arbeitstasks wurde umfangreiche Entwicklungsarbeit in die Weiterentwicklung, Erprobung und Validierung komplexer und vereinfachter Methoden zur thermischen Modellierung von CFS investiert. Ein neu implementiertes Verglasungsmodell in TRNSYS auf Basis detaillierter Modellierung nach ISO15099 und BSDF-Inputdaten wurde durch detailliertere thermische Modellparameter verbessert und deren Validität anhand Vergleichssimulationen sichergestellt.

Die vereinfachten Methoden wurden in Ihren Algorithmen verfeinert und gegen das komplexe Modell anhand eines Testcase verglichen. Die Ergebnisse zeigen sehr gute Ergebnisse für die Jahresbewertung von Raumtemperaturen und Heiz-/Kühlenergiebilanzen. Die Modelle funktionieren nicht ausreichend gut, um stationäre Detailanalysen bzw. Komfortauswertungen zu machen.

### 3.3.4 Validierung mit dynamischen Messdaten aus einem Langzeitmonitoring

Im Zuge einer durchgeführten Langzeitmessstudie an der Testfassade des Cell-Lab der SFL wurden Monitoringdaten zu Systemoberflächentemperaturen (Verglasung und Lamelle) sowie Lufttemperaturen im Scheibenzwischenraum aufgezeichnet. Ziel war es, valide Daten zu erhalten, an denen die Praktikabilität und Abbildungsgenauigkeit der umgesetzten thermischen Modelle untersucht werden kann.



**Abbildung 64: Testfeld am Hans Höllwart – Forschungszentrum; Links: Innenansicht, Mitte: Außenansicht; Rechts: Detail Sonnenschutz**

Ein Fensterelement, bestehend aus äußerer Prallscheibe, hinterlüftetem Zwischenraum mit Sonnenschutzvorrichtung und innerer Fenstertür mit Isolierverglasung, wurde mit der erforderlichen Messtechnik ausgestattet. Dabei werden in mehreren Höhen an allen Oberflächen Temperatursensoren angebracht. Neben den Temperaturen werden auch die Randbedingungen mittels Pyranometer, Wärmestromplatten, Ultraschall- u. Hitzedrahtanemometer erfasst. Die Messung wird als Langzeitmessung durchgeführt um möglichst unterschiedliche Situationen bezüglich den äußeren Randbedingungen (Sonneneinstrahlung, Sonnenstand, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit u. -richtung) untersuchen zu können. Es werden mehrere Messreihen durchgeführt, wobei unterschiedliche Sonnenschutzsystem mit unterschiedlichen Lamellenneigungen

Es wurden über einen Zeitraum von ca. 18 Monaten 2 unterschiedlichen Systeme im Scheibenzwischenraum unter verschiedenen Lamellenstellungen vermessen. Sowohl die verwendeten Systeme als auch die detaillierte Beschreibung sind im Kapitel zu AP7 sowie im technischen Report zu den Fallstudien beschrieben. Im Folgenden ist der Aufbau des Simulationsmodells und die Spezifikation der Modellparameter sowie der Ergebnisvergleich der Messdaten mit dem Simulationsmodell dargestellt und interpretiert.

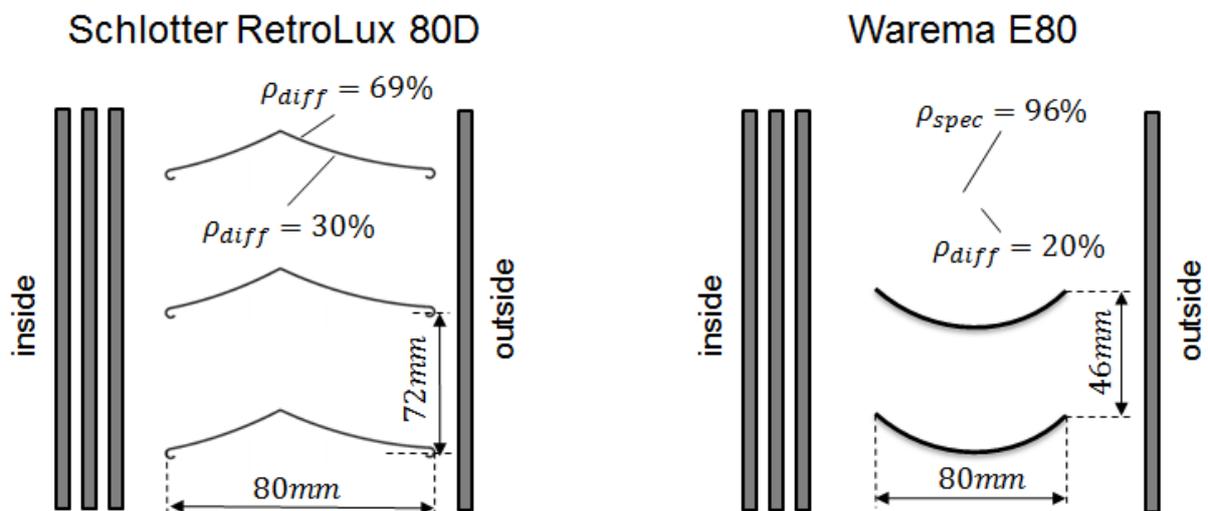
**Modellaufbau:**

Die Zusammenstellung der Modellierungs-Inputdaten erfolgte wie bei den stationären Vergleichen mit WINDOW7. Basierend auf den verfügbaren Herstellerangaben der verbauten Gläser (Abbildung 29) wurden die entsprechenden Produkte aus der International Glazing Database (IGDB) ausgewählt und die BSDFs basierend auf der Systemgeometrie mit genBSDF erzeugt. Durch Zusammensetzen des gesamten CFS wurden die solaren BSDFs als Input für die thermische Simulation generiert.

**Tabelle 12: Aufbau des Versuchselementes (Verglasung + Lamelle)**

Ebene	Element	Win-ID	Beschreibung	Dicke [mm]
1	Prall	893	VSG aus 2xESG, eisenoxydarmes Glas	12
2	SZR	1	Belüftet, mit Sonnenschutzeinrichtung (Raffstore)	150
3	IVG	11006	Saint-Gobain Planilux	6
	SZR	9	Luft (10 %), Argon (90 %)	16
4	IVG	11393	Saint-Gobain Planitherm	4
	SZR	9	Luft (10 %), Argon (90 %)	16
5	IVG	11398	Saint-Gobain Planitherm	6

Die Bestimmung der thermischen Parameter zur exakten Spezifikation der Lamelle erfolgte wiederum durch die erarbeiteten Methoden aus AP2 und T4.1. Als System 1 wurde die Schlotterer RetroLux 80D verbaut, welche eine diffus reflektierende Oberfläche besitzt, durch ihre spezielle Knickform aber für Tageslichtnutzung optimiert ist. Entgegen der konventionellen Montage (veränderlicher Stellwinkel über Fassadenhöhe) wurde der Behang mit gleichmäßiger Winkelstellung montiert, um einen aussagekräftigen Modellvergleich zu ermöglichen. Als System 2 wurde die WAREMA E80 Lichtlenklamelle mit hochverspiegelter „Miro 3“ Oberseite in den Scheibenzwischenraum verbaut. Beide Systeme sind haben sich am Markt bereits als verlässliche Produkte zur verbesserten Tageslichtnutzung im Innenraum etabliert.



**Abbildung 65: Skizzenhafte Darstellung des Fassadenaufbaus mit integrierter Lamelle**

**Tabelle 13: Spezifikation der Monitoring-Systeme**

	SYS 1	SYS 2
width	80mm	80mm
spacing	72mm	46mm
rise	15mm	11mm
$\epsilon_{front}$	0.69	0.04
$\epsilon_{back}$	0.93	0.80
material <sub>front</sub>	Millfinish MP	Miro3
material <sub>back</sub>	RAL7035	RAL7030

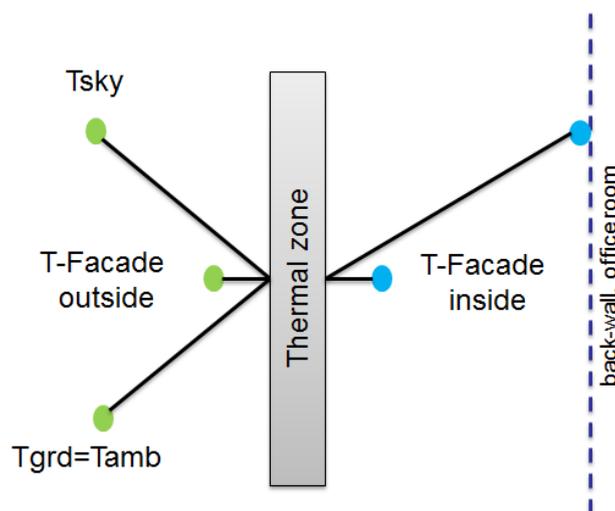
**Tabelle 14: Thermische Spezifikationsparameter**

SYS-1	00deg	45deg	85deg
TIR	0.3565	0.2392	0.0020
eps_f	0.5823	0.5957	0.7097
eps_b	0.5823	0.7256	0.9391
EOF	0.95	0.5	0.05
SYS-2			
TIR	0.3250	0.1817	0.0037
eps_f	0.5385	0.4447	0.04
eps_b	0.5385	0.6900	0.8098
EOF	0.95	0.5	0.05

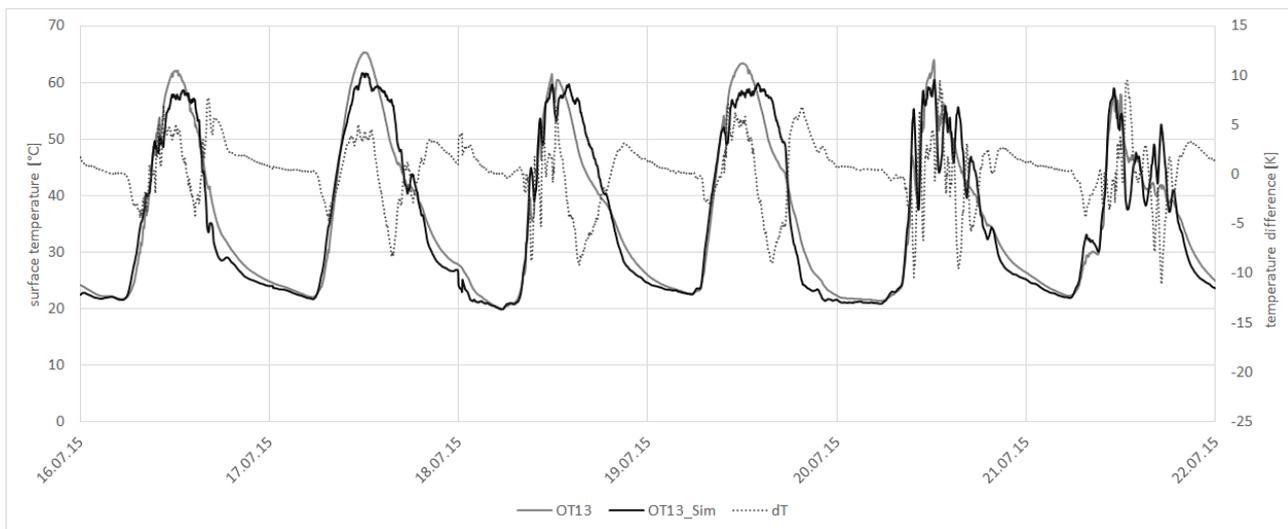
Für den Vergleich der gemessenen Werte wurde ein stark vereinfachtes Raummodell in TRNSYS Type56 realisiert, welches als betrachteten Bereich lediglich Fensterleibung reduzierte. Durch genaues Vermessen der Messrandbedingungen wurden so die Modellgrenzen möglichst genau definiert und es konnten zusätzliche Störeinflüsse vom Nachbarraum unterbunden werden (Abbildung 66).

Folgende Parameter waren entscheidend, um das Modell nach genau zu spezifizieren:

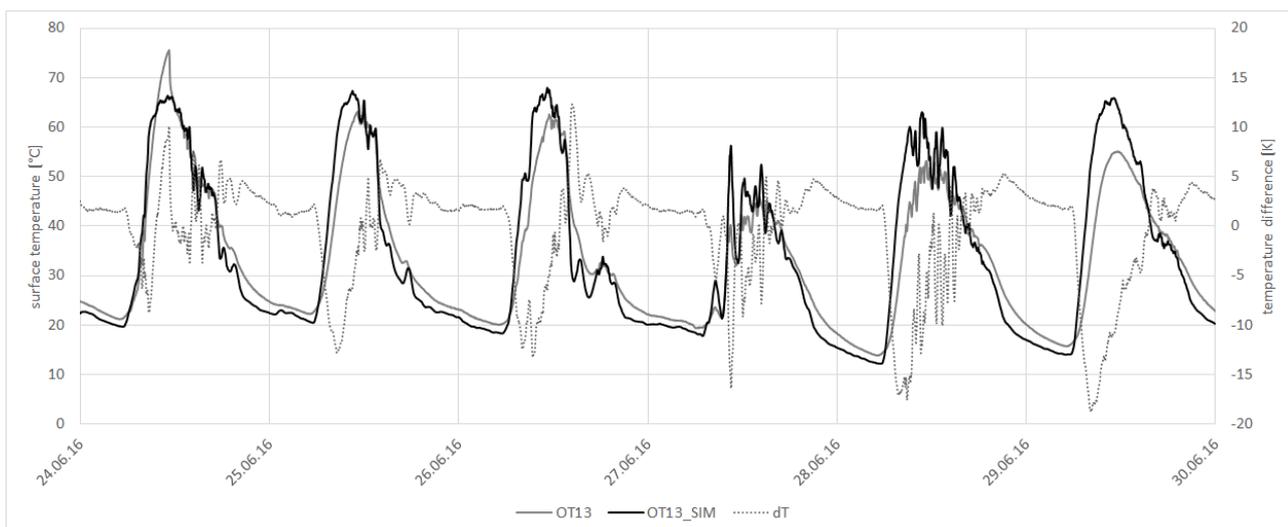
- Außentemperatur direkt vor Fassade
- Lufttemperatur direkt vor Innenverglasung (in Laibung)
- Luftgeschwindigkeiten an Innen und Außenverglasung (konvektive Wärmeübergänge)
- Solare Einstrahlungswerte direkt und diffus
- 



**Abbildung 66: Einfaches Raummodell zur Nachbildung der Messsituation**



**Abbildung 67: Vergleich Simulation-Messung: Wochentrend Lamellentemperatur System 1**



**Abbildung 68: Vergleich Simulation-Messung: Wochentrend Lamellentemperatur System 2**

In Abbildung 67 ist ein exemplarischer Zeitraum mit dem Temperaturtrend für die rückseitig gemessene Lamellentemperatur an System 1, verglichen mit der gleichzeitig simulierten Lamellentemperatur mit Simulationsmodell (Abbildung 66) und dem BSDF/ISO-Modell, dargestellt. Es zeigt sich, dass die Simulation die vorherrschenden Temperaturniveaus sehr gut nachbilden kann und das sich ebenso dynamische Effekte sehr gut abbilden.

In Abbildung 68 ist ident dazu der Temperaturtrend für die rückseitig gemessene Lamellentemperatur von System 2 im Vergleich zur Simulation dargestellt. Obwohl die Spiegellamelle ein sehr komplexes Strahlungsverhalten aufweist, lassen sich die gemessenen Temperaturen durch das Modell dennoch sehr gut abbilden.

Während bei der diffusen Lamelle die Spitzenwerte leicht unterschätzt wurden, liegen die simulierten Werte bei der Spiegellamelle leicht darüber. Zudem ist auch ein zeitlicher Versatz in den Ergebnissen erkennbar. Es wurde analysiert, dass mit zunehmender Anzahl an Verglasungen die thermische Trägheit des Verglasungssystems eine Rolle spielt. So kommt es aufgrund von auftretenden Zeitkonstanten zu einem Versatz zwischen realer und simulierter Temperatur von ca. 1h bei den durchgeführten Messungen. Es wurden detaillierte Auswertungen für alle vermessenen Systemschichten und Lufttemperaturen durchgeführt. In Tabelle 15 sind dazu die erzielten Werte für den RMSE, auf Basis der betrachteten Zeiträume der dargestellten Wochentrends. Es zeichnet sich in diesen Ergebnissen ab, dass die höchsten Abweichungen bei geschlossener Lamellenstellungen auftreten. Durch verbesserte Modellierung der konvektiven Wärmeübergänge an der innersten und äußersten Verglasungsoberfläche durch gemessene Luftströmung sowie Oberflächentemperatur konnte die Abweichung an den äußeren Oberflächen (OT10 / OT16) deutlich reduziert werden. Höchste Abweichungen treten in der Mitte des Systemaufbaus auf, da hier die absorbierte Temperatur nicht unmittelbar abgegeben werden kann und so die Einstellung der Modellparameter besonders sensibel reagiert.

**Tabelle 15: RMSE - Zusammenfassende Ergebnisse für alle Verglasungs-Layer und Lamellenstellungen**

<b>SYS1</b>	<b>dT_OT10</b>	<b>dT_LT12</b>	<b>dT_OT12</b>	<b>dT_OT13</b>	<b>dT_LT14</b>	<b>dT_OT15</b>	<b>dT_OT16</b>
	<b>[K]</b>						
00deg	2.575	4.187	3.249	3.111	3.981	4.542	2.572
45deg	1.889	2.806	2.323	2.277	2.682	3.137	1.169
85deg	4.433	5.765	5.455	5.432	5.387	6.524	1.694
<b>SYS2</b>							
00deg	4.702	5.149	6.243	6.248	6.027	6.820	1.322
45deg	3.112	3.794	4.962	5.266	6.223	6.844	0.943
80deg	2.594	3.793	10.327	10.790	9.902	12.395	3.251

### 3.4 Simulationsstudie zur Anwendung der entwickelten Methoden und Modelle

#### 3.4.1 Varianten der Simulationsstudie

Um die Anwendbarkeit und die Funktionalität des neu entwickelten Kopplungsalgorithmus „Artlight 2.0“ zu testen und zu validieren, wurde eine umfangreiche Simulationsstudie an verschiedenen Tageslichtlenksystemen durchgeführt. Dabei war es das vordergründige Ziel, die Stärken der neuen Simulationsroutine herauszuarbeiten. Im Zuge der Simulationsstudie mit Artlight sind auch indirekt die erfolgten Modellentwicklungen und Methoden aus AP2 – AP4 mit eingeflossen.

Im Folgenden sind die Rahmenbedingungen der Simulationsstudie sowie die erzielten Ergebnisse und Kenntnisse dargestellt. Für eine detaillierte Beschreibung des Modellaufbaus sowie die detaillierte Konfiguration der thermischen und lichttechnischen Simulation wird auf den Technischen Bericht zu AP7 verwiesen, welcher wesentlich detaillierter ausgeführt ist. Folgend ist auch anzumerken, dass die Untersuchungen der Simulationsstudie auch nach dem Projekt im Zuge von weiteren Forschungstätigkeiten noch weiter vertieft werden. Daher sind die Ergebnisse als einen aktuellen Stand des Wissens innerhalb des Konsortiums zu sehen.

Die Simulationsstudie umfasst 3 unterschiedliche Fassadensysteme, wobei alle drei Fassadensysteme mit zwei getrennt ansteuerbaren Behängen ausgeführt sind. Der obere Bereich kann somit gezielt zur Lichtlenkung eingesetzt werden, während der untere Behang primär zur solaren Abschattung dienen soll.

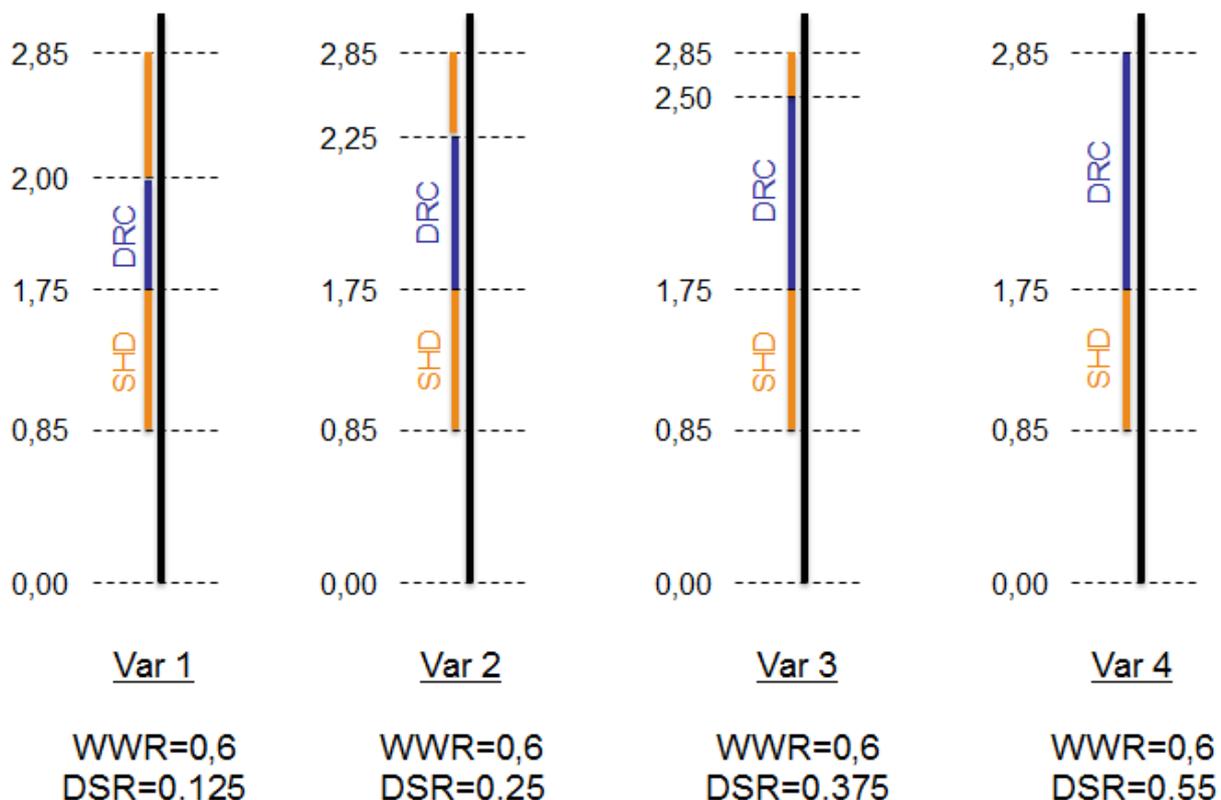


Abbildung 69: Untersuchte Fassadenvarianten

In Abbildung 69 sind die innerhalb der Simulationsstudie untersuchten Fassadenvarianten angeführt. Die gesamte Fassadenhöhe betrug 3m, wobei der untere Teil 0 - 0.85m sowie der obere Teil 2.85 – 3.0m opak ausgeführt war. Der transparente Fassadenteil in der Gesamthöhe von 2m (0.85 – 2.85m) setzte sich aus dem Verschattungsbehang (SHD, eng. Shading) und dem Lichtlenkbehang (DRC, engl. Daylight redirecting component) zusammen. Während der Anteil der transparenten Fläche innerhalb der Fassade für alle Simulationsvarianten konstant blieb ( $WWR=const.$ ), wurde das Verhältnis zwischen Abschattungsteil und Lichtlenkteil (DSR, daylight to shading ratio) variiert. Ziel war es, so den Einfluss eines erhöhten Anteils an Tageslichtlenkung innerhalb einer Fassade auf Heizen, Kühlen und Kunstlicht zu ermitteln.

Als Referenzsystem diente ein konventioneller außenliegender Raffstore (ohne Behangteilung) mit diffusen Abschattungslamellen. Im Vergleich dazu sind zwei Tageslichtlenksysteme mit jeweils zwei getrennten steuerbaren Behängen zur gezielten Tageslichtlenkung gegenübergestellt.

System 2 ist ein patentiertes Produkt der Firma Bartenbach GmbH und besitzt im unteren Bereich eine perforierte Lamelle, welche auch in geschlossener Stellung noch Durchsicht erlaubt. Der obere Behang ist als Spiegellamelle ausgeführt.

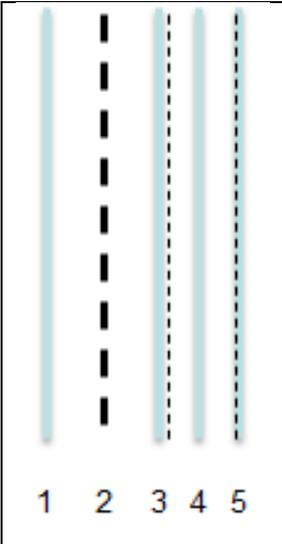
**Tabelle 16: Untersuchte Lamellensysteme**

<b>System</b>	<b>Bez.</b>	<b>Funktion</b>	<b>Beschreibung</b>
1	SYS 1	SHD	Außenliegender Raffstore (LAF)
3	SYS 2	DRC SHD	Lichtlenklamelle (konkav, spiegelnd) Abschattungslamelle (gelocht)
5	SYS 3	DRC SHD	Lichtlenklamelle (konkav, spiegelnd) integriertes, weiß-diffuses Raffstore

System 2 besitzt im unteren Behangteil eine diffus streuende Lamelle und konvexer Geometrie, welche weiß (RAL9006) lackiert ist. Im oberen Behangteil befindet sich die konkave Lichtlenklamelle, welche wiederum als Spiegellamelle ausgeführt ist. Im Gegensatz zu System 2, welches fix in den Führungsschienen fixiert ist und somit nicht gerafft werden kann, lässt sich das System 3 bei geringer Blendneigung völlig wegfahren. Ebenso kann das Referenzsystem (System 1) bei Bedarf gerafft werden. Beide Tageslichtsysteme sind im Scheibenzwischenraum angebracht.

In Tabelle 17 ist die Zusammenstellung der Verglasung angeführt. Die Verglasungsdaten sind der Software WINDOW7 (Verglasungsdatenbank IGDB) entsprechend der angeführten ID-Nummer ausgewählt worden. Die Lamellensysteme wurden durch BSDFs abgebildet und entsprechend in WINDOW (an Stelle von Position 2) eingefügt. Im Fall des Referenzsystems fällt die äußere Prallscheibe (Position 1) weg. Für den Fall der 3-Scheibenverglasung weist das System einen g-Wert: 0.47 bzw. U-Wert 0,7W/m²K auf, während mit zusätzlicher Prallscheibe eine g-Wert: 0.45 bzw. U-Wert 0.57W/m²K resultiert. Der visuelle Transmissionsanteil des Verglasungspaketes reduziert sich durch die zusätzliche Prallscheibe von 0.6 auf 0.55. Sowohl thermisch, als auch lichttechnisch muss deshalb die zusätzliche Einwirkung einer Prallscheibe mit einberechnet werden.

**Tabelle 17: Verglasungszusammenstellung**



Pos	ID	Name	mm
1	7199	Float-Glas	6.0
2	2	Luft (100%)	80.0
3	7111	Float-Glas (mit lowE)	6.0
	9	Argon/Air (90%/10%)	16.0
4	7199	Float-Glas	6.0
	9	Argon/Air (90%/10%)	16.0
5	7111	Float-Glas (mit lowE)	6.0

Neben der Variation der Fassadenbehänge wurden noch Parametervariationen bei der eingesetzten Steuerstrategie sowie beim Blendkriterium durchgeführt. Die Ergebnisse dazu sollen zeigen, welches Blendkriterium sich als effizient hinsichtlich Kunstlichteinsparung und gleichzeitiger Reduktion von Heiz- und Kühlbedarf auswirkt. Die Praktikabilität der beiden implementierten Steuerstrategien (thermische vs. lichttechnische Optimierung) wird ebenso analysiert. In Tabelle 18 sind dazu die Simulationsvarianten inkl. der veränderten Parameter dargestellt, welche auf jede Fassadenvariante und jedes Lamellensystem angewendet wurden. „L\_SHD“ bezeichnet die definierte Blendgrenze für den Abschattungsbehang, „L\_DRC“ die definierte Blendgrenze für den Lichtlenkbehang. Mit Variante 5 wurde der Grenzwert für den Lichtlenkteil nochmals erhöht, um eine noch bessere Tageslichtlenkung zu erzielen.

**Tabelle 18: Variation der Simulationsparameter**

Variante	Control	L_SHD	L_DRC
1	th_control	5000 cd/m <sup>2</sup>	5000 cd/m <sup>2</sup>
2	dl_control	1000 cd/m <sup>2</sup>	1000 cd/m <sup>2</sup>
3	dl_control	3000 cd/m <sup>2</sup>	3000 cd/m <sup>2</sup>
4	dl_control	5000 cd/m <sup>2</sup>	5000 cd/m <sup>2</sup>
5	dl_control	5000 cd/m <sup>2</sup>	8000 cd/m <sup>2</sup>

Um eine bessere Einschätzung der geografischen/klimatischen Einflüsse auf die Ergebnisse zu erhalten, wurde die Simulationsstudie parallel mit gleichen System- und Referenzraumdefinitionen für folgende Standorte durchgeführt:

- Oslo, Norwegen
- Innsbruck, Österreich
- Amman, Jordanien

### 3.4.2 Modellaufbau

Für den Modellaufbau wurde wiederum der Referenzraum nach (Werner M. et al. 2010) verwendet. Für das thermische Modell in TRNSYS Type56 wurde jeweils ein 3D-Sketchup-Modell konstruiert und in das Gebäudemodell importiert. Die internen Lasten und Belegungszeiten erfolgten nach der SIA 2024 (SIA 2024). Die bauphysikalischen und haustechnischen Randbedingungen wurden gemäß Tabelle 9 definiert.

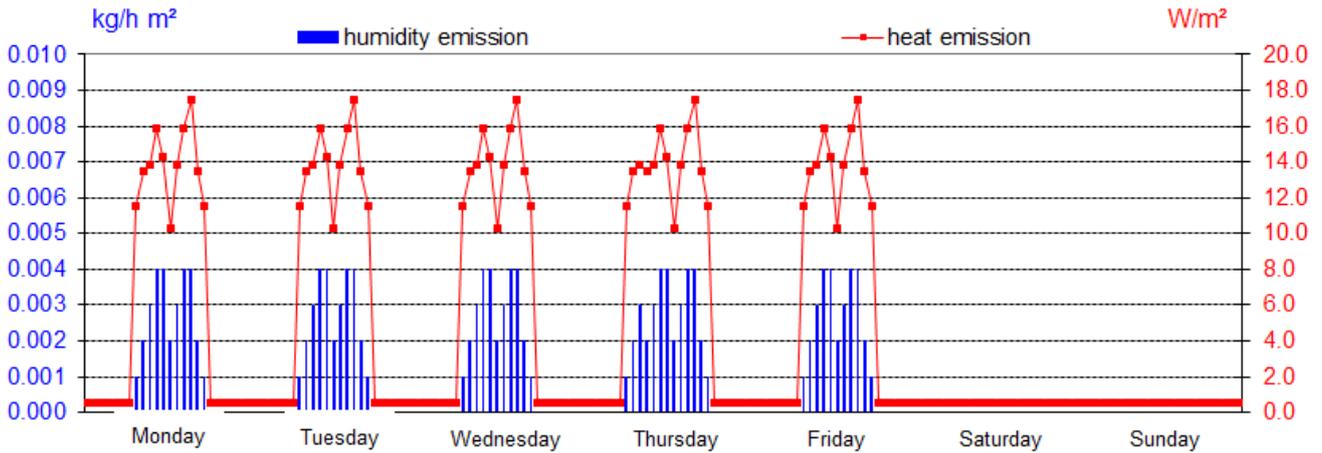


Abbildung 70: Interne Lasten nach SIA2024 (Wochenprofil)

In Abbildung 71 sind die geometrischen Positionen im thermischen Modell für die Einprägung der Personenlasten (P1/P2), Gerätelasten (EQ1/EQ2) und das Kunstlicht dargestellt. P1 und P2 sind zudem die zugeordneten Punkte für die Komfortauswertung.

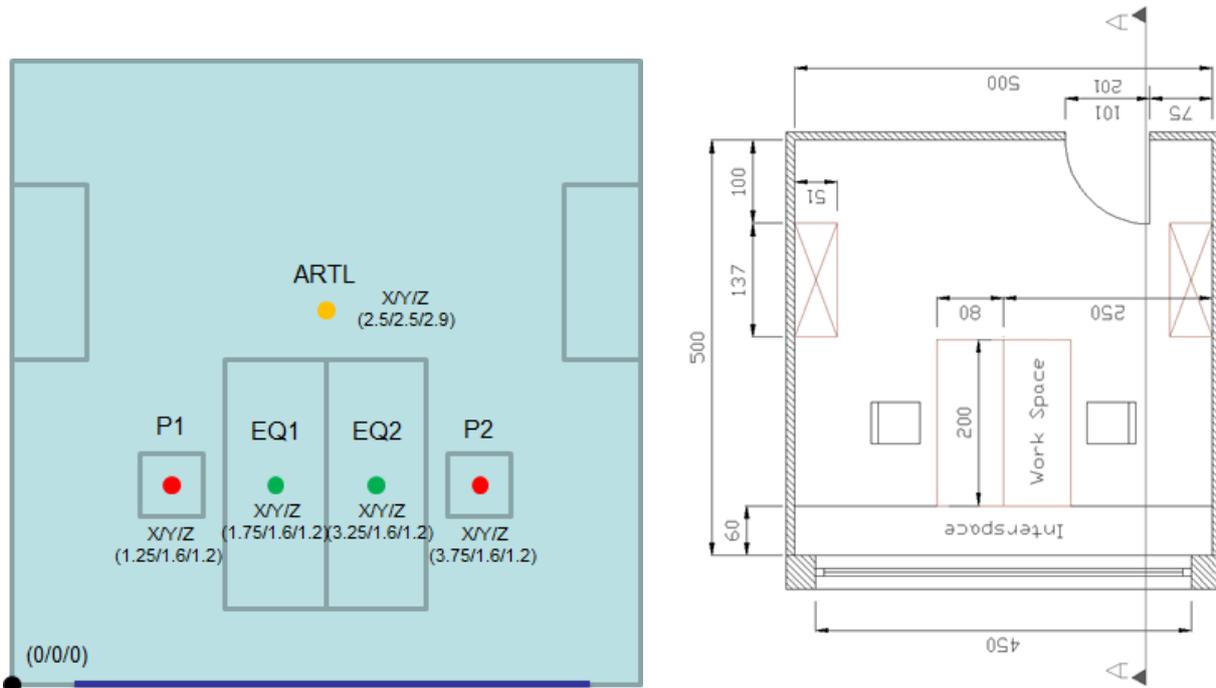


Abbildung 71: Definition der internen Lastpunkte (Komfortauswertung) auf Basis des Bürogrundrisses

In Abbildung 72 sind die Definitionen des lichttechnischen Simulationsmodells, basierend auf der Referenzraumgeometrie dargestellt. Die Szene beinhaltet ein Sensorgrid von 8x10 Sensoren in der Ebene der Tischfläche (0,85m über dem Fußboden). Der Mittelwert aus diesen 80 Sensoren sollte mindestens 500lx zu jeder Anwesenheitsstunde betragen. Entsprechend diesem Wert versucht die Steuerung durch iterative Lösung die Lamelle so weit zu öffnen, bis dieser Wert erfüllt ist.

Dem entgegen wirken 8x14 Sensoren in der Fassadenebene. Diese sind definiert als Blickrichtungen, ausgehend von den jeweils beiden Viewer-Points (L1, L2). Überschreitet von einem dieser beiden Punkte eine von den 112 zu Fassade gerichteten Blickrichtungen einen definierten Leuchtdichtegrenzwert, so wird die Lamellen um eine Stellung weiter geschlossen, um Blendung zu vermeiden. Dieses Kriterium hat immer Priorität gegenüber dem Beleuchtungsstärkezielwert auf der Tischfläche. Somit ergibt sich ein Optimum zwischen Tageslichtnutzung und Blendungsvermeidung, wodurch die Lamellenposition bestimmt wird. Der Grenzwert für die maximal erlaubte Leuchtdichte ist ein Parameter, der in der Simulationsstudie gemäß Tabelle 18 variiert wird.

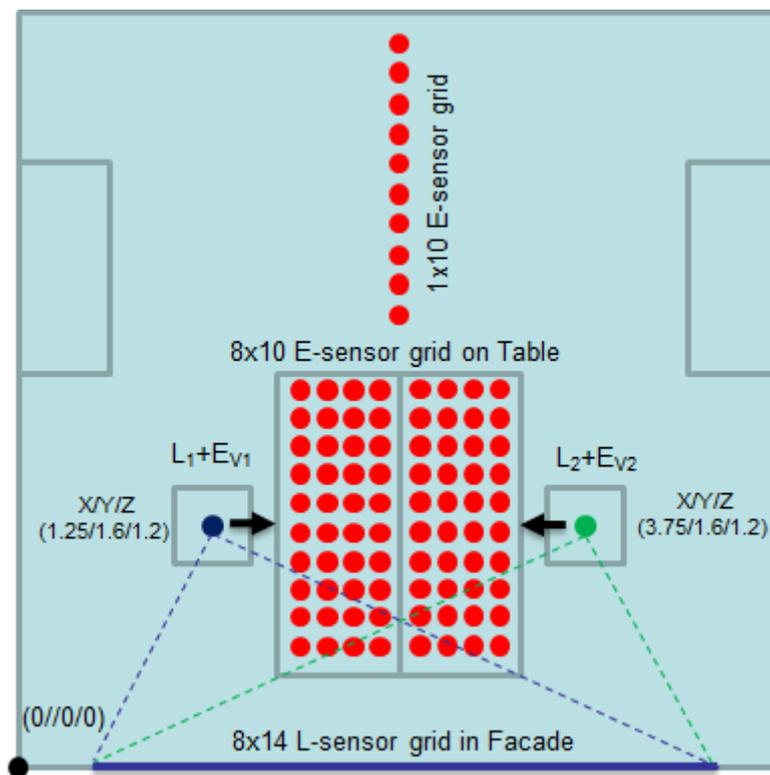


Abbildung 72: Definition der Sensorpunkte im lichttechnischen Modell (RADIANCE-Szene)

Zusätzlich sind noch weitere 10 Sensoren in der Raumtiefe positioniert. Diese beeinflussen allerdings nicht die Steuerung der Fassade, sondern dienen nur einer zusätzlichen Kunstlichtzuschaltung, für den Fall das ein Mittelwert von 300lx durch diese Sensoren nicht erreicht werden kann. Die Kunstlichtzuschaltung für den gesamten Raum erfolgt zuerst auf Basis der fehlenden Beleuchtungsstärke auf 500lx am Tisch, erst danach wird bei Bedarf noch Kunstlicht für den Raumbereich (Space) bis auf 300lx zugeschaltet.

### 3.4.3 Ergebnisauswertung

Die Ergebnisauswertung und Interpretation erfolgte anhand folgender Parameter:

#### Lichttechnisch:

- Beleuchtungsstärken Tisch (carpet-plots)
- Illuminance maps Raum (für 1 Tag im Jänner und Juli)
- Verlauf Beleuchtungsstärke Raumtiefe
- Leuchtdichten an Fassade (carpet-plots)
- Metriken für Raum-grid (Raster: 0,2 x 0,2m in 0,85m Höhe):
  - $DA_{300}$ ,  $DA_{500}$ ,  $DA_{5000}$
  - $sDA_{300}$ ,  $sDA_{1000}$  (nicht in Kombination mit ASE)
  - $UDI_{100}$ ,  $UDI_{100,2000}$ ,  $UDI_{2000}$

#### Systemtechnisch:

- Lamellenstellungen für alle Behänge (carpet-plots)
- Lamellenstellungs-Häufigkeitsverteilung (bar-plots)
- Thermal request (carpet-plots)

#### Thermisch:

- Heiz- und Kühllasten (absolut, Endenergie)
- Kunstlichtbedarf (absolut, Endenergie)
- Raumtemperatur, operative Raumtemperatur, innere Scheibentemperatur)
- Thermischer Komfort für beide Viewer-points (PMV/PPD)

Im Folgenden sind die wesentlichen Aussagen daraus dargestellt und zusammengefasst.

In Abbildung 73 ist der Endenergiebedarf für die Flügellamelle (aufgeteilt in Heiz-, Kühl- und Kunstlichtbedarf) für alle Simulationsvarianten (VAR1-VAR5) angeführt. Die Ergebnisse für die einzelnen Fassadenvarianten (FA1-FA4) sind durch unterschiedliche Farben im Diagramm dargestellt – die Legende dazu ist in der Bildunterschrift angeführt. Es sind vergleichend die Ergebnisse für den Standort Innsbruck (links) und den Standort Amman (rechts) angeführt. Während in VAR1 eine Optimierung hinsichtlich Heiz- und Kühlenergiebedarf erfolgt, wird in VAR2-5 tageslichttechnisch optimiert. Dies zeigt sich deutlich durch den starken Abfall an Kunstlichtbedarf mit steigendem Leuchtdichtegrenzwert in der Fassade. Durch das weniger strenge Blendkriterium kann die Lamelle hier wesentlich öfters öffnen und ermöglicht durch erhöhten Tageslichteintrag den Kunstlichtbedarf deutlich zu reduzieren. Am effektivsten wirkt sich der Sprung von  $1000\text{cd/m}^2$  auf  $3000\text{cd/m}^2$  aus, da ab dieser Grenze vor allem bei diffuser Lichtsituation die Fassade nicht abschattet. Der Einfluss unterschiedlicher Leuchtdichtegrenzwerte auf den Kühlbedarf ist für den Fall der Flügellamelle sehr gering. Es ist daher für dieses System von geringerer Relevanz, wie groß der Lichtlenkbereich in der Fassade ist.

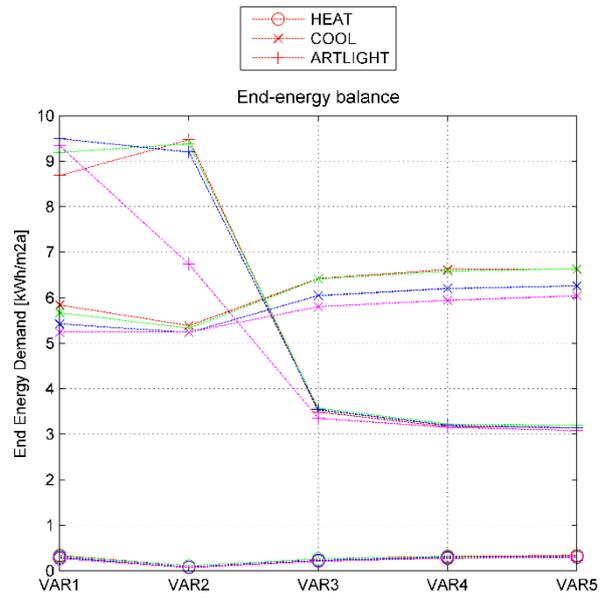
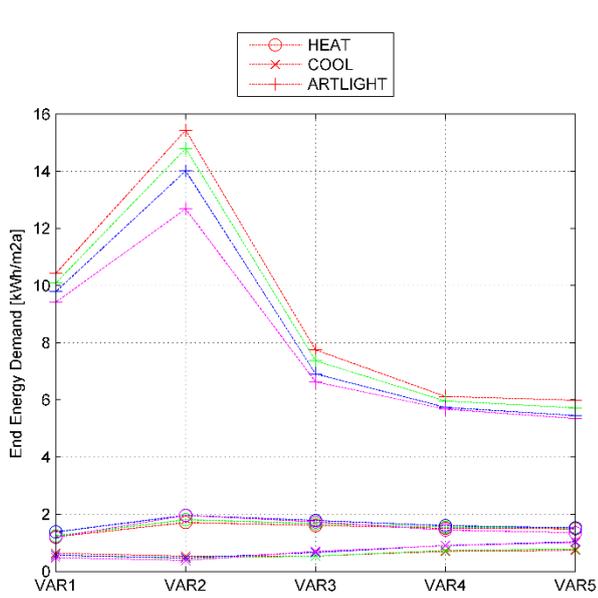


Abbildung 73: Endenergiebedarf, SYS 2: Innsbruck (li.), Amman (re.),  
FA1=rot, FA2=grün, FA3=blau, FA4=mangenta

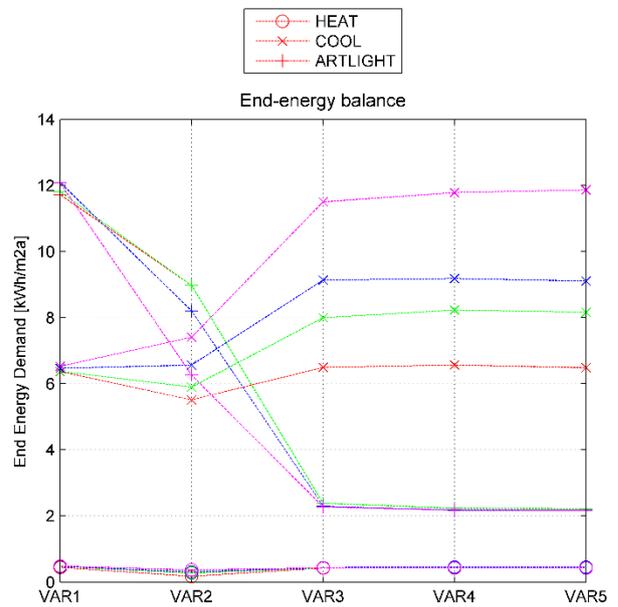
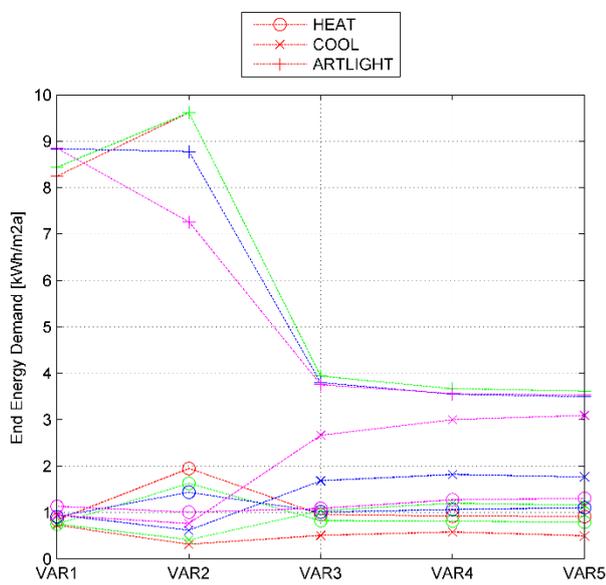


Abbildung 74: Endenergiebedarf, SYS 3 : Innsbruck (li.), Amman (re.),  
FA1=rot, FA2=grün, FA3=blau, FA4=mangenta

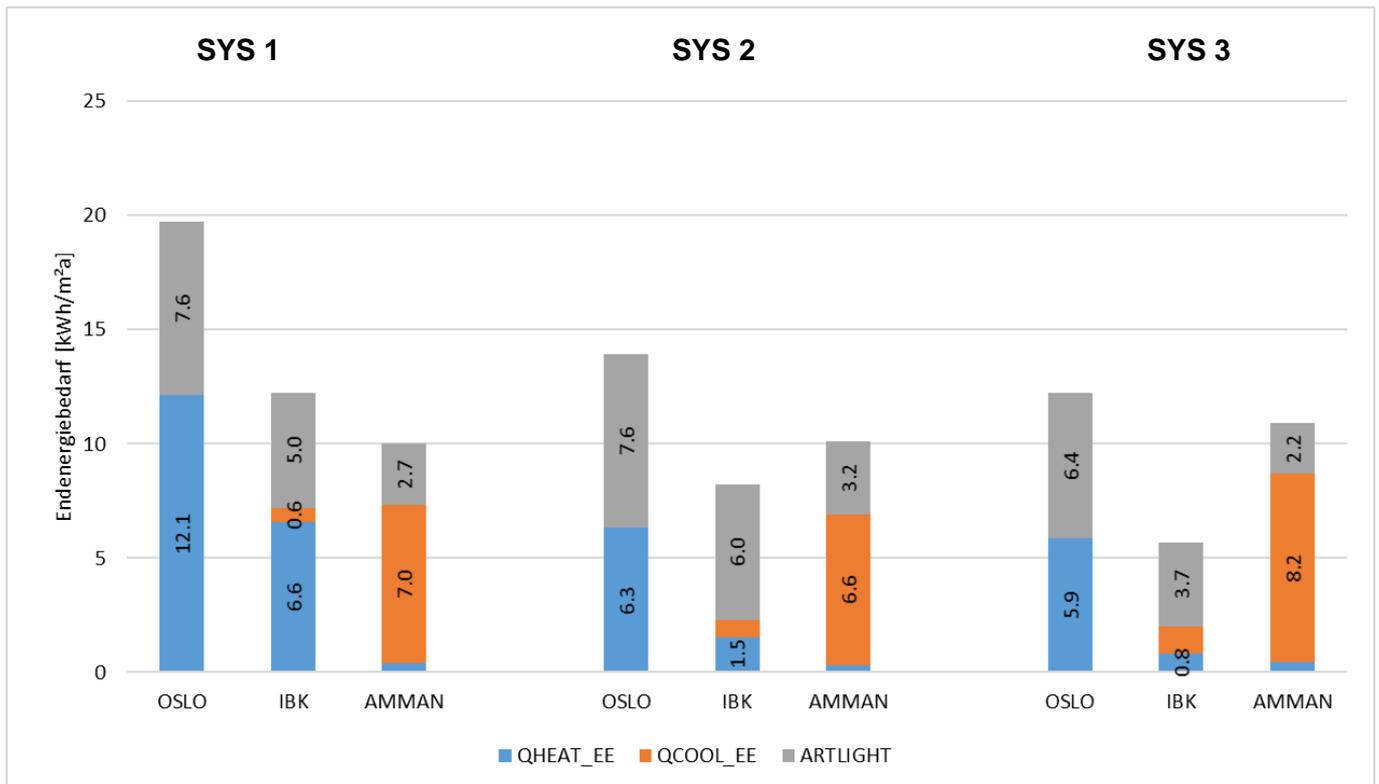


Abbildung 75: Ergebnis Endenergiebedarf (Fassadenvariante 2 + Simulationsvariante 4)

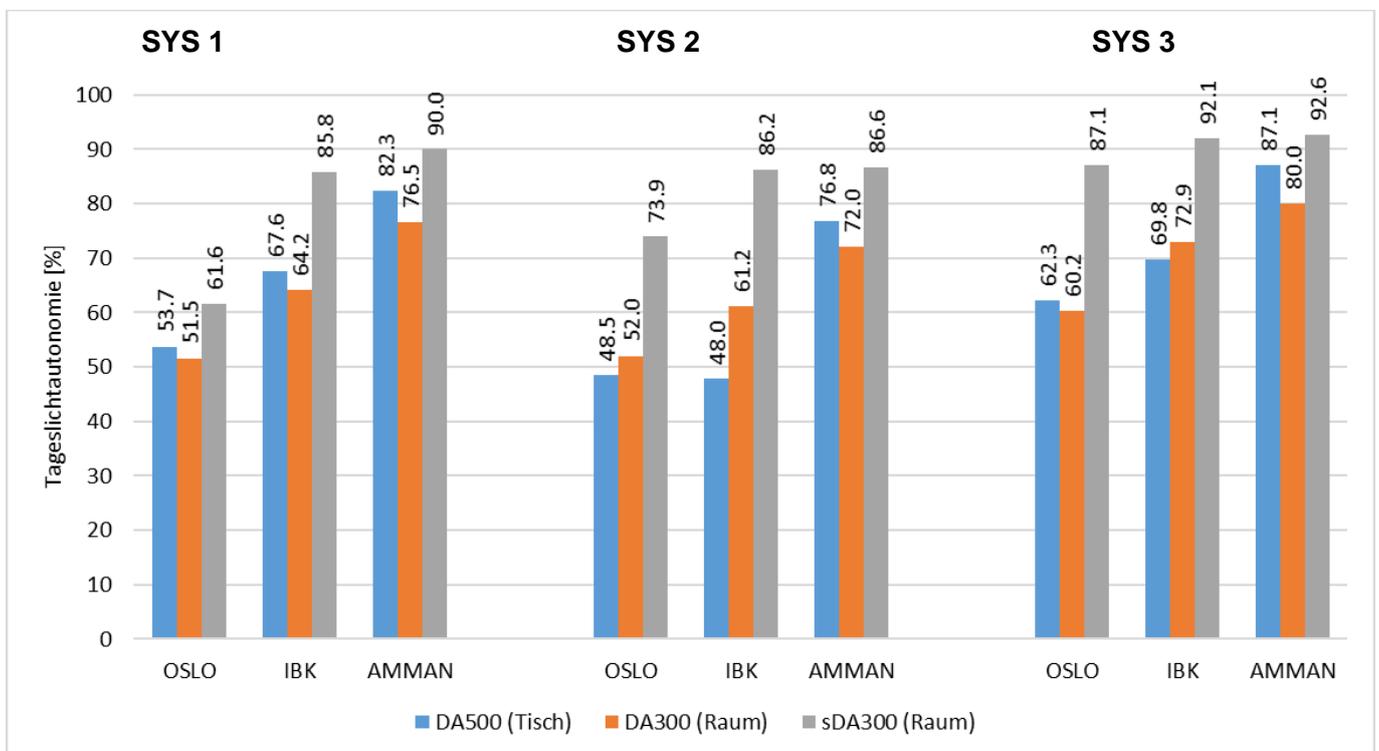


Abbildung 76: Ergebnis Tageslichtautonomie (Fassadenvariante 2 + Simulationsvariante 4)

Für die Ergebnisse mit System 3 (Abbildung 74) ergibt sich ein wesentlich differenzierteres Bild. Sowohl für den Standort Innsbruck, als auch für den Standort Amman zeigt sich ein sehr hoher Einfluss eines zunehmenden Lichtlenkanteiles auf den Kühlenergiebedarf. Zeitgleich tritt aber keine Verbesserung der Kunstlichtsituation mit höheren Lichtlenkanteil auf, womit sich ein größerer Bereich der Lichtlenklamelle als 25cm hier (FA1) hier negativ auf die Gesamtsituation auswirkt.

Dies kann begründet sein in der Geometrie des Lichtlenkbehanges, dessen Lamellen einen sehr engen Abstand im Vergleich zur Lamellengröße aufweisen. Dadurch kann diese Lamelle häufiger geöffnet bleiben, ohne das Blendung verursacht wird. Allerdings führt dies zeitgleich zu einem starken Anstieg der solaren Einträge, was sich vor allem in Amman negativ auswirkt. Die Verwendung einer weiß-diffusen Abschattungslamelle im unteren Behang erhöht außerdem die Nutzung von diffusem Licht im fensternahen Bereich, wodurch der nur mehr geringe Effekt der Lichtlenkung auf den Kunstlichtbedarf hier erklärt werden kann. Deutlich ist auch, dass der Heizbedarf am Standort Innsbruck im Fall eines strengen Blendkriteriums (VAR2) merklich zunimmt, da speziell in den Wintermonaten bei tiefen Sonnenständen die Lamellengeschlossen werden müssen und so nutzbare Solareinträge verhindern. Im Falle eines konventionellen Raffstores ist dieser Effekt noch deutlicher.

Aus Sicht der Kunstlichteinsparung macht sich ein höherer Lichtlenkbereich in der Fassade vor allem in Fällen strenger Blendungskriterien bemerkbar. Mit zunehmendem Blendkriterium ermöglicht auch die Abschattungslamelle bereits eine ausreichend gute Tageslichtnutzung im fensternahen Bereich.

In Abbildung 75 ist nun der Endenergiebedarf für die Fassadenvariante 2 (50cm Lichtlenkbereich) und die Simulationsvariante 4 (5000cd/m<sup>2</sup> Blendgrenzwert für beide Behänge) dargestellt. Für die Standorte Oslo und Innsbruck ergibt sich jeweils ein deutlich reduzierter Heizenergiebedarf gegenüber dem außenliegenden Raffstore. Der Grund dafür liegt zum einen in der verbesserten Nutzbarmachung solarer Gewinne während der Wintermonate durch das Tageslichtlenksystem. Es kommt aber auch der Faktor hinzu, dass die Lichtlenksysteme noch eine zusätzliche Prallscheibe sowie die Lamelle im Zwischenraum positioniert haben, was sich beides positiv auf den Heizenergiebedarf auswirkt. Hinsichtlich des Kunstlichtbedarfes konnte keine signifikante Reduktion durch den Einsatz eines Tageslichtlenksystems erreicht werden. Es hat sich herausgestellt, dass für einen quadratischen Büroraum mit entsprechend hoher Fensterfläche bereits eine ausreichende Tagesbelichtung mit einer konventionellen Abschattungslamelle erreicht werden kann.

In Abbildung 76 sind die Ergebnisse zu den ausgewerteten Tageslicht-Metriken dargestellt. Die Tageslichtautonomie (DA<sub>500</sub>) bezieht sich nur auf die 80 Sensoren auf der Tischfläche und beschreibt, zu wie vielen Prozent an Anwesenheitsstunden im Jahr ein durchschnittlicher Beleuchtungsstärkewert von mindestens 500lx erreicht wird. Die Tageslichtautonomie (DA<sub>300</sub>) bezieht sich auf die gesamte Raumfläche und bezieht sich auf den Schwellwert von 300lx. Die spatial Daylight Autonomy (sDA<sub>300,50%</sub>) bezieht sich ebenso auf die gesamte Raumfläche und beschreibt, an zu wie vielen Prozent an Anwesenheitsstunden zumindest 50% der inkludierten Sensorpunkte im Jahr den durchschnittlichen Beleuchtungsstärkewert von 500lx erreichen. Es ist hier anzugeben, dass die Auswertung der sDA-Norm hier nicht in Verbindung mit der ASE-Norm zur Blendungsbewertung verwendet wurde, sondern das Blendkriterium gemäß Leuchtdichtegrenzwert. Die Auswertung ist daher nicht vollständig konform zu den geforderten Bedingungen in der Norm (IES LM-83-12).

Demnach würde ein sDA-Wert von >55% einen Raum bereits als ausreichend tagesbelichtet bewerten. Ab einem Wert von >75% gilt ein Raum als sehr gut tagesbelichtet. Demnach zeigt sich, dass mit den Tageslichtlenksystemen in jeder dargestellten Variante in Abbildung 76 eine sehr gute Tagesbelichtung erreicht werden kann. Mit dem externen Raffstore zeigt sich nur in Oslo ein gerade noch ausreichender Wert für die Tagesbelichtung mit einem sDA-Wert von 61,6%.

Auffällig ist auch, dass die Tageslichtsysteme mit zunehmend südlicheren Standorten tageslichttechnisch weniger Effekt zeigen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass an nördlichen Standorten vermehrt tiefe Sonnenstände zu Blendsituationen führen, weshalb Abschattungslamellen häufiger schließen müssen und Tageslichtlenksysteme dennoch über den oberen Behang Licht in den Raum bringen. Hohe Sonnenstände im Süden erlauben auch einem konventionellen Raffstore zumindest teilweise zu öffnen, wodurch eine verbesserte Tagesbelichtung möglich ist.

Für die Tageslichtautonomie am Tisch ( $DA_{500}$ ) zeigen sich für die Flügellamelle sogar niedrigere Werte verglichen zum konventionellen Raffstore. Dies ist dadurch begründet, dass System 2 systembedingt nicht gerafft werden kann, während die beiden anderen Systeme völlig wegfahrbar sind. Dies ist speziell für den fensternahen Bereich entscheidend, hier ein gerafftes System wesentlich mehr Tageslicht in den Raum lässt als eine Lamelle in offener Stellung. Dieser Aspekt ist daher ein entscheidender Systemnachteil der Flügellamelle gegenüber den anderen Systemen.

Derselbe Effekt ist auch noch zu erkennen für die Auswertung der raumweiten Tageslichtautonomie ( $DA_{300}$ ). System 3 erreicht aber dennoch bessere Werte als das externe Raffstore. Dennoch zeigen die Ergebnisse für diese Raumsituation (geringe Raumtiefe) keine eindeutige tageslichttechnische Verbesserung durch Lichtlenksysteme, welche den Mehraufwand an Installation und Technik rechtfertigen würde. Es werden deshalb noch weitere Simulationsvarianten mit tiefen Raumgeometrien untersucht.

## 4 Ausblick und Empfehlungen

Durch das Forschungsprojekt lightSIMheat war es den involvierten Partnern im Konsortium möglich, sich eine hohe Expertise im Bereich der Modellierung und simulationstechnischen Analyse aus thermischer sowie tageslichttechnischer Sicht zu erarbeiten. Aufgrund der stark simulationstechnisch ausgerichteten Forschungsfrage konnte eine Vielzahl an bestehenden Methoden überprüft und validiert werden und daraus eigene Bewertungstools erarbeitet werden.

Die neu entwickelten bzw. weiterentwickelten Simulationsmodelle (vereinfachte Thermische Modelle, komplexes CFS-Modell nach BSDF/ISO15099, Kopplungsroutine ARTLIGHT, vereinfachtes Monatsbilanzverfahren) innerhalb des Projektzeitraumes können nun in weiterführenden Projekten eingesetzt und weiter optimiert werden. Die durchgeführten Forschungsarbeiten im Projekt lieferten zudem einen wesentlichen Inhalt zu zwei Dissertationen am Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen der Universität Innsbruck sowie drei durchgeführten Masterarbeiten.

Das entwickelte simulationsgestützte Messverfahren bei Bartenbach liefert die Grundlage für zukünftige Projekte, für komplexe Lamellensysteme auf Basis der stationären Vermessung von g-Werten eine dynamische Simulation mittels vereinfachter thermischer Modelle bzw. eine qualitative Aussage über deren energetischen Verhalten durch die erarbeiteten Kennzahlen zu machen.

In weiterführenden Projekten wird nun die entwickelte Kopplungsroutine ARTLIGHT zur detaillierten Systemanalyse angewendet sowie das thermische Modell nach BSDF-Daten und ISO15099. Beide Methoden zeigten ein großes Potential sowie hohe Flexibilität in deren Anwendung, was einen entscheidenden Mehrwert speziell für die Anwendung in der Forschung bedeutet. Im Speziellen konnte mit dem neu überarbeiteten Kopplungskonzept ARTLIGHT 2.0 in lightSIMheat der entscheidende Schritt umgesetzt werden, um das Verfahren für die weitere Verwendung spannend zu machen. Die vereinfachten thermischen Modelle für die dynamische Gebäudesimulation zeigen gute Resultate und können vor allem wertvoll sein in einer kombinierten Anwendung mit dem simulationsgestützten Messverfahren.

Mit dem vereinfachten Monatsbilanzverfahren konnten bereits sehr gute Ergebnisse im Vergleich zum stundenbasierten Verfahren erzielt werden, weshalb eine Integration in bereits bestehende Monatsbilanztools zu thermischen Bewertung angestrebt werden soll.

Hinsichtlich der detaillierten thermischen Modellierung von CFS werden noch weitere Bestrebungen in einer Verbesserung der Modellierung des langwelligen Strahlungsaustausches sowie des konvektiven Verhaltens investiert. Hierzu konnten in lightSIMheat wichtige erste Analysen und Erkenntnisse erarbeitet werden, jedoch sollten in einem weiteren Schritt die Algorithmen der ISO15099 werden hier die Algorithmen der ISO15099 nochmals genauer analysiert werden hinsichtlich komplexer Lamellengeometrie.

Im Bereich der lichttechnischen Simulation konnten bereits eine Vielzahl an Methoden (PhotonMap, 5-Phasen Methode...) hinsichtlich deren Eignung für die zeitschrittgekoppelte Simulation in lightSIMheat geprüft werden. Dennoch gibt es auch hier noch viele Fragestellungen, die weiter vertieft werden sollten. Ein nächster Schritt könnte demnach eine genauere Analyse der aktuell umgesetzten Blendungsbewertung sein. Ein Vergleich mit etablierten Verfahren (DGP, UGI) wird deshalb in weiterführenden Projekte untersucht werden. Dahingehend könnten dann auch detailliertere Verfahren wie die 5-Phasen-Mehtode wieder interessant werden, da diese deutliche Verbesserung in der Blendungsbewertung ermöglicht.

Die dargestellte Simulationsstudie wird im Zuge einer laufenden Dissertation noch abgeschlossen. Es zeigte sich aber bereits, dass Tageslichtlenksysteme vor allem für Räume mit tiefen Geometrien Vorteile aufweisen. Ebenso werden noch detailliertere Untersuchungen wie Lamellenstellungen, Tageslichtverteilung im Raum etc. genauer analysiert, um die gewonnen Ergebnisse noch besser bewerten zu können.

## 5 Literaturverzeichnis

Hiller, Marion; Schöttl, Peter (2014): Modellierung komplexer Verglasungssysteme in TRNSYS. In: *Proceedings Bausim 2014*.

IES LM-83-12, 2012: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE).

McNeil, A. (2014): BSDFs, Matrices and Phases, zuletzt geprüft am 16.09.2016.

SIA 2024, 2006-08: Standard-Nutzungsbedingungen für die Energie- und Gebäudetechnik.

EN ISO 15099, 15.11.2003: Thermal performance of windows, doors and shading devices — Detailed calculations, zuletzt geprüft am 18.08.2015.

Transsolar Energietechnik GmbH: TRNSYS17 Manual. Multizone Building modelling with Type56 and TRNBuild. Transsolar Energietechnik GmbH. Stuttgart.

Werner M.; Neyer, D.; Leitner, J. (2010): Definition des Referenzraumes - Licht aus Fassade. Hg. v. Bartenbach LichtLabor GmbH, Universität Innsbruck und Technische Universität Graz.

McNeil, A. (2013). The Five-Phase Method for Simulating Complex Fenestration with Radiance. [http://radiance-online.org/learning/tutorials/fivephasetutorialfiles/Tutorial-FivePhaseMethod\\_v2.pdf](http://radiance-online.org/learning/tutorials/fivephasetutorialfiles/Tutorial-FivePhaseMethod_v2.pdf), 1-23. McNeil, A., Lee, E.S. (2013). A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. *J Building Performance Simulation* 6(1), 24-37.

Proietti E., Wambsganß M., Feldmeier F. (2016). Spektrale winkel- und polarisationsabhängige Transmissionsgrade von 2-fach Verglasungen und Auswertung deren melanopischer Wirksamkeit. LICHT 2016, Karlsruhe, Deutschland, September 2016.

Terrestrial Light (2016). Skyometer. Online: <http://terrestriallight.com>

Ward, G. (2007). Utilizing BTDF Window Data, 6th Intl. Radiance Workshop, Minneapolis, MN, USA, Oktober 2007.

Athienitis, a. (2002). A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device. *Solar Energy*, 72(4), 271–281.

[https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(02\)00016-](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(02)00016-)

de Boer, J. (2004). Tageslichtbeleuchtung und Kunstlichteinsatz in Verwaltungsbauten mit unterschiedlichen Fassaden. Fraunhofer-IRB-Verl.

Gopp, S. (2014). Bachelorarbeit - Sensitivitätsanalyse von komplexen Fassadensystemen. University of Innsbruck.

Lehar, M., & Glicksman, L. (2007). Rapid algorithm for modeling daylight distributions in office buildings. *Building and Environment*, 42(8), 2908–2919. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.02.010>

Ng, E. (2001). A simplified daylighting design tool for high-density urban residential buildings. *Lighting Research and Technology*, 33(4), 259–269. <https://doi.org/10.1177/136578280103300417>

Reinhart, C., & LoVerso, V. (2010). A rules of thumb-based design sequence for diffuse daylight. *Lighting Research and Technology*, 42(1), 7–31. <https://doi.org/10.1177/1477153509104765>

Werner, M., Geisler-Moroder, D., Junghans, B., Ebert, O., & Feist, W. (2016). DALEC - A Novel Web-Tool for Integrated Day- and Artificial Light & Energy Calculation. *Journal of Building Performance Simulation*. <https://doi.org/10.1080/19401493.2016.1259352>

Werner, M., Gopp, S., Geisler-Moroder, D., Junghans, B., & Ebert, O. (2015). Vereinfachte Fassadenplanung hinsichtlich Kunstlicht-, Heiz- und Kühlbedarf. In 19. Internationale Passivhaustagung. Leipzig.

## 6 Kontaktdaten

### Projektleiter

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, AB Energieeffizientes Bauen  
Technikerstrasse 13, 6020 INNSBRUCK,  
Tel. +43 (0) 512 507 63650, [wolfgang.streicher@uibk.ac.at](mailto:wolfgang.streicher@uibk.ac.at)  
Tel. +43 (0) 512 507 63654, [martin.hauer@uibk.ac.at](mailto:martin.hauer@uibk.ac.at)

### Projektpartner

Bartenbach GmbH  
Rinner Strasse 14, 6071 ALDRANS  
Tel. +43 (0) 512 3338-66, [wilfried.pohl@bartenbach.com](mailto:wilfried.pohl@bartenbach.com)  
Tel. +43 (0) 512 3338-86, [andreas.ampenberger@bartenbach.com](mailto:andreas.ampenberger@bartenbach.com)

### SFL technologies GmbH

Innovationspark 1, 8152 Stallhofen  
Tel. +43 (0) 57667 3141, [mueller.mario@sfl-technologies.com](mailto:mueller.mario@sfl-technologies.com)